

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA PARA  
OBTENÇÃO DE FUROS VISANDO A MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS  
PELO MÉTODO DO FURO CEGO**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA  
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**KLEBER MEDEIROS JUSTUS**

**FLORIANÓPOLIS, MARÇO DE 1999**

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA PARA OBTENÇÃO  
DE FUROS VISANDO A MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS PELO MÉTODO DO  
FURO CEGO**

**KLEBER MEDEIROS JUSTUS**

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE**

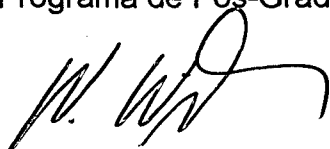
**MESTRE EM ENGENHARIA**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL  
PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**



PROF. JÚLIO C. PASSOS, PH.D.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica



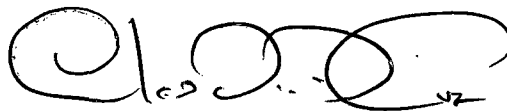
PROF. DR-ING. WALTER LINDOLFO WEINGAERTNER

Orientador

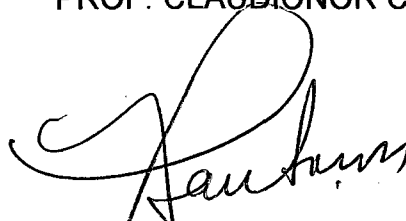
**BANCA EXAMINADORA:**



PROF. ARMANDO ALBERTAZZI GONÇALVES JR., DR ENG.



PROF. CLAUDIONOR CRUZ, Dr.



PROF. IVAN GONÇALVES DE SOUZA, Dr.

A Raquel  
A Gabriel

## AGRADECIMENTOS

A minha esposa, Raquel, pelo amor, carinho, apoio e confiança nos caminhos até agora por nós percorridos.

A meu filho, Gabriel pela alegria, felicidade e amor incondicional.

Aos meus pais, Jarbas e Alcina, pelo apoio, incentivo, compreensão e carinho não só para a realização deste trabalho mas em todo os momentos de minha existência.

As minhas irmãs, Kellen e Alessandra, pelo apoio e união da família.

Ao Prof. Dr.-Ing. Walter L. Weingaertner, coordenador do LMP, Laboratório de Mecânica de Precisão, pela orientação à este trabalho, apoio, amizade e exemplo de dedicação à pesquisa.

Ao Prof. Dr. Eng. Rolf B. Schroeter, pela amizade, apoio e sugestões à realização deste trabalho.

Ao CNPQ, pela concessão de bolsa de estudo e recursos para a realização deste trabalho.

Aos colegas de trabalho no LMP, M. Eng. Cleiton R. Teixeira, M. Eng. Moacir Eckhardt, M. Eng. Milton Pereira, M. Eng. Rodrigo Stoeterau, Eng. Francisco Sales Basto, Eng. Márcio Braghini Rezende, pela amizade, sugestões e apoio à realização deste trabalho.

Ao pessoal de apoio do LMP pelo auxílio à realização deste trabalho.

Aos amigos e colegas Eduardo Weingaertner, Luciano Sena, Thiago Freitas, Gerson , entre tantos colegas do LMP pela convivência e amizade.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho o meu sincero obrigado.



**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA PARA OBTENÇÃO  
DE FUROS VISANDO A MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS PELO MÉTODO DO  
FURO CEGO**

**SUMÁRIO**

<b>SIMBOLOGIA</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE QUADROS</b>	<b>xx</b>
<b>RESUMO</b>	<b>xxii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xxiii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>01</b>
<b>2 OBJETIVOS</b>	<b>06</b>
<b>3 MÉTODO DO FURO CEGO PARA A DETERMINAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS</b>	<b>08</b>
<b>4 USINAGEM ELETROQUÍMICA</b>	<b>11</b>
4.1 HISTÓRICO	11
4.2 DISSOLUÇÃO ANÓDICA	14
4.3 COMPORTAMENTO ANÓDICO DOS METAIS	18
4.4 COMPORTAMENTO DE REMOÇÃO	24
4.4.1 Comportamento de remoção do tipo A	26
4.4.2 Comportamento de remoção do tipo B e C	28
4.4.3 Comportamento de remoção do tipo D, E e F	28
4.5 REAÇÕES CATÓDICAS	32

<b>4.6 CONFINAMENTO DA DISSOLUÇÃO ANÓDICA EM USINAGEM</b>	
<b>ELETROQUÍMICA</b>	<b>33</b>
<b>4.7 PARÂMETROS DE PROCESSO</b>	<b>40</b>
4.7.1 Tensão da fonte	40
4.7.2 Velocidade de avanço	42
4.7.3 Solução eletrolítica	44
<b>4.8 PRECISÃO</b>	<b>46</b>
<b>4.9 INTEGRIDADE SUPERFICIAL</b>	<b>47</b>
<b>4.10 SEGURANÇA E AMBIENTE</b>	<b>49</b>
4.10.1 Segurança	49
4.10.2 Impacto Ambiental	51
<b>5 EQUIPAMENTO DE FURAÇÃO ELETROQUÍMICA</b>	<b>52</b>
<b>5.1 ESTRUTURA</b>	<b>52</b>
<b>5.2 FONTE DE ALIMENTAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA</b>	<b>54</b>
<b>5.3 ELETRODOS-FERRAMENTA E DISPOSITIVOS</b>	<b>55</b>
<b>5.4 MECANISMO DE AVANÇO</b>	<b>60</b>
<b>5.5 UNIDADE ELETROLÍTICA</b>	<b>61</b>
<b>5.6 SISTEMAS DE CONTROLE</b>	<b>64</b>
<b>6 DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>65</b>
<b>6.1 DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO</b>	<b>65</b>
6.1.1 A estrutura	66
6.1.2 Fonte de alimentação	68
6.1.3 Mecanismo de avanço	68
6.1.4 Sistemas de controle	69
6.1.5 Unidade eletrolítica	70

6.1.6 Eletrodo-ferramenta	72
6.1.7 Dispositivos auxiliares	72
6.1.8 Corpos de Prova	73
<b>7 DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS</b>	<b>74</b>
7.1 Especificação do eletrólito	74
7.2 Especificação do eletrodo	75
7.3 Corpo de prova	76
7.4 Determinação dos parâmetros de trabalho	77
7.5 Critério de avaliação dos ensaios	79
7.5.1 Critério forma geométrica do furo	79
7.6 Metodologia de medição das grandezas geométricas	81
7.7 Metodologia de pré-ensaio	83
7.8 Resultado dos ensaios	84
7.8.1 Eletrólito com concentração 10 % de NaCl	84
a – Tensão aplicada de 5 V	84
b – Tensão aplicada de 10 V	88
c – Tensão aplicada de 15 V	94
7.8.2 Eletrólito com concentração 15 % de NaCl	99
a – Tensão aplicada de 5 V	99
b – Tensão aplicada de 10 v	102
c – Tensão aplicada de 15 V	108
7.8.3 Ensaios realizados com $\text{NaNO}_3$	114
<b>8 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS</b>	<b>116</b>
8.1 Conclusões	116
8.2 Sugestões para futuros trabalhos	119

---

<b>9 BIBLIOGRAFIA</b>	<b>122</b>
9.1 Referências Bibliográficas	122
9.2 Bibliografia de apoio	124
<b>10 ANEXOS</b>	<b>130</b>
10.1 Características dos equipamentos utilizados	130
10.1.1 Motor de corrente contínua	130
10.1.2 Bomba de alimentação de eletrólito	130
10.1.3 Fonte de alimentação de energia	131
10.1.4 Multímetro	131
10.1.5 Equipamento de aquisição de dados	131
10.1.6 Software de aquisição de dados	131
10.2 Procedimento para cálculo da TRM do aço rápido 10 % Co	132
10.3 Planilha de medições do software ÂNCORA	135

**SIMBOLOGIA**

<b>símbolo</b>	<b>unidade</b>	<b>designação</b>
A	[cm <sup>2</sup> ]	área projetada de trabalho
a		Peso atômico
E	[1/A s]	equivalente eletroquímico
E <sub>a</sub>	[V]	potencial anódico
E <sub>ss</sub>	[V]	potencial anódico inicial
E <sub>g</sub>	[V]	potencial anódico de evolução de oxigênio
F	[A s]	constante de Faraday
h	[mm]	largura do “gap”
h <sub>e</sub>	[mm]	largura do “gap” de equilíbrio
I	[A]	corrente elétrica
J	[A/ cm <sup>2</sup> ]	densidade de corrente
K	%	fator de confinamento
k <sub>e</sub>	[ohm <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup> ]	condutividade do eletrólito
k	[ohm <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup> ]	condutividade
m	[g]	massa total de material dissolvido
<i>m</i>	[g/s]	taxa de remoção em massa de material
N	-	número atômico
R	[ohm]	resistência elétrica
V	[V]	diferença de potencial
t	[s]	tempo

$z$	-	valência
$v$	$[\text{cm}^3]$	volume total de material dissolvido
$\dot{v}$	$[\text{cm}^3/\text{s}]$	taxa volumétrica de remoção de material
$v_a$	$[\text{cm}/\text{g s}]$	velocidade de remoção
$v_{ef}$	$[\text{cm}^3/\text{g s A}]$	valor removido efetivo
$v_f$	$[\text{cm}/\text{s}]$	velocidade de avanço da ferramenta
$v_r$	$[\text{cm}^3]$	volume observado de material dissolvido
$v_{sp}$	$[\text{cm}^3/\text{g s A}]$	fator de proporcionalidade para o volume de material dissolvido
$v_{spl}$	$[\text{cm}^3/\text{g s A}]$	fator de proporcionalidade efetivo para o volume de material dissolvido
$\eta$	%	eficiência de corrente
$\rho$	$[\text{g}/\text{cm}^3]$	densidade
$\delta$	$[\text{mm}]$	espessura da camada contorno de difusão

**LISTA DE FIGURAS**

<b>FIGURA</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>Pg.</b>
Figura 1	Representação esquemática do processo de dissolução anódica em uma solução eletrolítica [7]	12
Figura 2	Representação esquemática do processo de furação eletroquímica [3,13]	13
Figura 3	Definição da área projetada de trabalho [14]	18
Figura 4	Curvas de polarização para o Fe em solução eletrolítica de NaCl [10]	20
Figura 5	Tipos de comportamento de remoção [3,4]	26
Figura 6	Influência dos mecanismos de remoção sobre o comportamento das curvas características $v_a \times J$ [3,4]	27
Figura 7	Comportamento de transição das curvas características $v_a \times J$ na faixa inferior de corrente [3,4]	29
Figura 8	Reações catódicas e anódicas na usinagem eletroquímica [14]	32
Figura 9	Furação eletroquímica [10]	34
Figura 10	Curvas de polarização [10]	36
Figura 11	Classificação dos parâmetros do processo de usinagem eletroquímica [16]	41
Figura 12	Fatores que influenciam o processo de usinagem eletroquímica, ECM [16]	41
Figura 13	Variação do tamanho do “gap” com o tempo de usinagem [13]	43

Figura 14	Impacto da usinagem eletroquímica no meio ambiente e saúde do operador [9]	51
Figura 15	Esquemas construtivos da estrutura de equipamentos de usinagem eletroquímica [10,12]	53
Figura 16	Moderno equipamento de usinagem eletroquímica [15]	54
Figura 17	Eletrodo-ferramenta revestido para furação eletroquímica [5]	57
Figura 18	Esquema de alimentação de solução eletrolítica por fluxo direto [8]	59
Figura 19	Esquema de alimentação de solução eletrolítica por fluxo reverso [8]	59
Figura 20	Esquema de alimentação de solução eletrolítica por fluxo cruzado [8]	59
Figura 21	Representação esquemática de uma unidade eletrolítica [16]	61
Figura 22	Vista geral do equipamento desenvolvido para usinagem eletroquímica	67
Figura 23	Vista lateral esquerda do equipamento de usinagem eletroquímica destacando o acoplamento do motor ao eixo do pinhão	69
Figura 24	Vista lateral direita do equipamento de usinagem eletroquímica destacando o manípulo de acionamento manual	70
Figura 25	Vista frontal do equipamento de usinagem eletroquímica com destaque para o reservatório e bomba de solução eletrolítica	71
Figura 26	Vista da ferramenta utilizada instalada na parte central da cuba coletora da solução eletrolítica	72



Figura 27	Corpos de prova já usinados com a ferramenta utilizada	73
Figura 28	Vista lateral e superior do eletrodo	75
Figura 29	Vistas e cortes esquemáticos de um corpo de prova com indicação da localização das usinagens	77
Figura 30	Considerações sobre distorções na cilindridade [1]	80
Figura 31	Considerações sobre distorções no perpendicularismo [1]	81
Figura 32	Tela do programa de medição Âncora	82
Figura 33	Posição para medição das grandezas geométricas dos furos obtidos nos ensaios através do software ÂNCORA	83
Figura 34	Gráfico de um ensaio onde ocorreu curto-circuito logo após início da usinagem ( $v_f = 0,78$ mm/min, $V = 5V$ e concentração de eletrólito de 10% de NaCl m/V)	85
Figura 35	Furo realizado com velocidade de avanço da ferramenta de 0,56 mm/min, tensão de 5V e concentração de eletrólito de 10 % de NaCl m/V	86
Figura 36	Gráfico de usinagem realizada com $v_f = 0,56$ mm/min, $V = 5 V$ e concentração de eletrólito de 10% NaCl m/V	86
Figura 37	Foto superior de furo realizado sob os parâmetros: velocidade de avanço da ferramenta de 0,56 mm/min, tensão de 5V e concentração de eletrólito de 10 % de NaCl m/V	87
Figura 38	Forma geométrica característica de furo obtido por usinagem eletroquímica obtida com as seguintes condições, velocidade de avanço da ferramenta 0,56 mm/min, tensão aplicada 10 V e concentração do eletrólito de 10% de NaCl m/V	88

Figura 39	Gráfico da variação da corrente com o tempo de usinagem do furo apresentado na figura 38.	89
Figura 40	Furo com formato característico obtido nas condições de velocidade de avanço da ferramenta 0,78 mm/min, tensão 10 V e concentração do eletrólito igual a 10 % de NaCl m/V	90
Figura 41	Gráfico da variação da corrente de usinagem com o tempo do furo apresentado na figura 40	90
Figura 42	Furo obtido sob as seguintes condições de usinagem , velocidade de avanço da ferramenta 1,13 mm/min, tensão aplicada 10 V e concentração do eletrólito de 10 % de NaCl m/V	91
Figura 43	Gráfico da variação da corrente de usinagem com o tempo nas condições da figura 42	92
Figura 44	Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 0,56 mm/min, tensão de 10V e concentração de eletrólito de 10% de NaCl m/V, onde se nota saída preferencial de eletrólito	92
Figura 45	Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 0,78 mm/min, tensão de 10V e concentração de eletrólito de 10% de NaCl m/V, pode-se verificar vários pontos de saída preferencial de eletrólito prejudicando a circularidade	93
Figura 46	Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 1,13 mm/min, tensão de 10V e concentração de eletrólito de 10% de NaCl m/V, nota-se uma saída mais homogênea do eletrólito, apresentando uma circularidade melhor que os anteriores	93

Figura 47	Furo obtido com velocidade de avanço da ferramenta 0,56 mm/min, tensão 15 V e eletrólito com 10% de NaCl m/V	94
Figura 48	Gráfico da variação da corrente de usinagem pelo tempo para o furo da figura 47.	95
Figura 48	Furo obtido nas condições de velocidade e avanço da ferramenta 0,78 mm/min, tensão 15 V e concentração do eletrólito de 10% de NaCl m/V, onde é clara a forma característica da furação eletroquímica.	95
Figura 49	Gráfico característico da variação da corrente com o tempo de usinagem para as condições da figura 48.	96
Figura 50	Furo característico obtido nas condições de velocidade de avanço da ferramenta 1,13 mm/min, tensão 15 V e concentração do eletrólito de 10% de NaCl m/V.	97
Figura 51	Gráfico característico da variação da corrente de usinagem em relação ao tempo de usinagem nas condições de usinagem da figura 50	97
Figura 52	Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 1,13 mm/min, tensão de 15V e concentração 10% de NaCl m/V, nota-se a existência de saídas preferenciais de eletrólito	98
Figura 53	Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 0,78 mm/min, tensão de 15V e concentração 10% de NaCl m/V, nota-se a extrema irregularidade causada por várias saídas preferenciais de eletrólito	99

Figura 54	Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 0,56 mm/min, tensão de 15V e concentração de eletrólito 10% de NaCl m/V, nota-se a existência de saída preferencial de eletrólito	99
Figura 55	Furo característico obtido nas condições de usinagem com concentração do eletrólito de 15 % de NaCl m/V, velocidade de avanço da ferramenta de 0,56 mm/min e tensão aplicada de 5 V.	100
Figura 56	Gráfico característico da variação da corrente com o tempo durante a usinagem nas condições de trabalho da figura 55	190
Figura 57	Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 0,56 mm/min, tensão de 5V e concentração de eletrólito de 15% NaCl m/V, notar a boa circularidade	101
Figura 58	Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 0,56 mm/min, tensão de 5V e concentração de eletrólito de 15% NaCl m/V, notar a boa circularidade.	101
Figura 59	Furo obtido com as seguintes condições de usinagem, velocidade de avanço da ferramenta 0,56 mm/min, tensão 10 V e concentração de NaCl de 15 % m/V, observar inclinação das paredes laterais e pequeno 'nib' central	102
Figura 60	Gráfico característico da variação da corrente durante o tempo de usinagem para os parâmetros de usinagem do furo apresentado na figura 59	103

Figura 61	Foto de um furo obtido com os seguintes parâmetros de usinagem: concentração de eletrólito 15 % de NaCl m/V, 10 V de tensão aplicada e 0,78 mm/min de velocidade de avanço da ferramenta	104
Figura 62	Gráfico da variação da corrente de usinagem com o tempo para furo apresentado na figura 61, que apresenta o formato característico para condições de usinagem semelhantes	105
Figura 63	Furo obtido com os parâmetros de usinagem : 15 % concentração de NaCl m/V, 10 V tensão aplicada e 1,13 mm/min velocidade de avanço da ferramenta	105
Figura 64	Gráfico característico da variação da corrente com tempo de usinagem para as condições do furo apresentado na figura 63	106
Figura 65	Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 1,13 mm/min, tensão de 10V e concentração de eletrólito de 15% NaCl m/V, nota-se a existência de saídas preferenciais de eletrólito	106
Figura 66	Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 0,56 mm/min, tensão de 10V e concentração de eletrólito de 15% NaCl m/V, notar a ovalização da boca do furo	107
Figura 67	Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 0,78 mm/min, tensão de 10V e concentração de eletrólito de 15%, apresentando boa circularidade	107

Figura 68	Furo obtido com concentração do eletrólito igual a 15 % de NaCl m/V, velocidade de avanço da ferramenta de 0,56 mm/min e tensão aplicada de 15 V.	108
Figura 69	Gráfico característico da variação da corrente de usinagem com o tempo para as condições de usinagem da figura 68.	109
Figura 70	Forma de furo obtido com condições de usinagem iguais à 15 % de concentração de eletrólito NaCl m/V, 15 v de tensão aplicada e velocidade de avanço da ferramenta de 0,78 mm/min	110
Figura 71	Gráfico característico dos furos obtidos com as condições de usinagem da figura 70.	110
Figura 72	Furo característico obtido com as seguintes condições de usinagem tensão aplicada 15 V, concentração do eletrólito 15 % de NaCl m/V e velocidade de avanço da ferramenta de 1,13 mm/min	111
Figura 73	Gráfico característico da variação da corrente de usinagem pelo tempo para as condições de usinagem apresentadas na figura 70.	112
Figura 74	Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 0,56 mm/min, tensão de 15V e concentração de eletrólito de 15% NaCl m/V, notar a boa circularidade	112
Figura 75	Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 0,78 mm/min, tensão de 15V e concentração de eletrólito de 15% NaCl m/V, notar as saídas preferenciais de eletrólito	113

- Figura 76 Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 1,13 mm/min, tensão de 15V e concentração de eletrólito de 15% NaCl m/V, notar a circularidade, neste caso boa, apesar de leve saída preferencial à esquerda 113
- Figura 77 Furos realizados com eletrólito a base de  $\text{NaNO}_3$  115

**LISTA DE QUADROS**

<b>QUADRO</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>Pg</b>
<b>Quadro 1</b>	Comparação entre diferentes processos de usinagem através de seus efeitos [1]	<b>3</b>
<b>Quadro 2</b>	Principais fontes de erro na técnica do furo [1]	<b>10</b>
<b>Quadro 3</b>	Taxas teóricas de remoção de material para usinagem eletroquímica de metais puros assumindo eficiência de corrente 100% [7,14]	<b>17</b>
<b>Quadro 4</b>	Comportamento de remoção em solução de NaCl [3,4]	<b>31</b>
<b>Quadro 5</b>	Comportamento de remoção em solução de NaNO <sub>3</sub> [3,4]	<b>31</b>
<b>Quadro 6</b>	Tipos de soluções eletrolíticas [3,8]	<b>45</b>
<b>Quadro 7</b>	Possíveis alterações superficiais resultantes de processos de usinagem [14]	<b>48</b>
<b>Quadro 8</b>	Tensão de fadiga de alto ciclo para usinagem eletrolítica [14]	<b>48</b>



<b>Quadro 9</b>	Valores típicos de parâmetros de usinagem eletroquímica [14]	<b>49</b>
<b>Quadro 10</b>	Resumo dos efeitos à saúde do operador e a segurança das instalações das principais soluções eletrolíticas [8,14]	<b>50</b>
<b>Quadro 11</b>	Material para eletrodos-ferramenta [14]	<b>56</b>
<b>Quadro 12</b>	Material para revestimento de eletrodos-ferramenta [14]	<b>57</b>
<b>Quadro 13</b>	Composição química do aço-rápido 10% Co [19]	<b>76</b>

## **AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA PARA OBTENÇÃO DE FUROS VISANDO A MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS PELO MÉTODO DO FURO CEGO**

### **RESUMO**

O processo de usinagem eletroquímica consiste na remoção de material por dissolução anódica com fonte elétrica externa em uma solução eletrolítica. Para a realização do trabalho, desenvolveu-se um equipamento de usinagem eletroquímica visando a obtenção de furos com diâmetros de 1 a 2 mm e profundidade de até 6 mm empregando uma solução eletrolítica a base de NaCl. Para verificação do comportamento do processo em relação às características do furo, o equipamento desenvolvido permitia a variação de três parâmetros; velocidade de avanço do eletrodo de trabalho, diferença de potencial aplicada entre os eletrodos e a concentração da solução eletrolítica. Como material da peça a ser usinada utilizou-se aço rápido com 10% de cobalto. Os furos obtidos foram analisados quanto à geometria do fundo, conicidade do furo, arredondamento das bordas, repetibilidade de resultados e afastamento do diâmetro nominal, em função dos parâmetros de entrada. O trabalho descreve as premissas necessárias para o entendimento do processo bem como o equipamento de usinagem eletroquímica para a obtenção de furos para a técnica de medição de tensões residuais pelo método do furo cego.

## **EVALUATION OF ELECTROCHEMICAL MACHINING PROCESSES FOR OBTAINING HOLES SEEKING THE MENSURATION OF RESIDUAL STRESS FOR THE BLIND HOLE METHOD**

### **SUMMARY**

The process of electrochemical machining consists of the removal material through anodic dissolution with external electric source in a electrolytic solution. For the realization of the research, na equipment of electrochemical machining was developed seeking obtaining of holes with diameters of 1 to 2 milimeters and depth of up to 6 milimeters using a electrolytic solution of NaCl. For verification of the behavior of the process in relation to the characteristics of the hole, the developed equipment allowed the variation of three parameters; feed rate of the tool electrode, applied voltage and the concentration of the electrolytic solution. The material of the piece to be machined is the fast steel with 10% of Cobalt. The obtained holes were analyzed with relationship to the geometry, tapering of the hole, rounding of the borders, repetibility of the results and difference of the nominal diameter in function of the process parameters. The textdescribes the necessary premises for the understanding of the process as well as the equipment of electrochemical machining for the obtaining holes for the technique of mensuration of residual stress for the method of the blind hole.

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Na medição de tensões residuais pelo método do furo cego parte do desempenho global está relacionado diretamente à controlabilidade da técnica de furação. Pode-se afirmar que a operação mais crítica do método do furo cego é justamente a execução do furo [1]. Os desvios das características idealizadas dos furos representam fontes de erros que podem se somar às possíveis fontes de erros relativas à geometria da peça e ao campo de tensão residual existente.

Quanto menor for o diâmetro do furo, maior será a relevância das características geométricas e também maior será a possibilidade de introdução de erros devido às tensões geradas durante o processo de furação. As principais características de um processo de furação adequado para utilização no método do furo cego são:

- a forma geométrica obtida;
- a não-introdução de novas tensões residuais à peça pelo processo de furação.

A escolha da técnica de furação é uma tarefa difícil quando se tem por objetivo a sua aplicação na medição de tensões residuais com baixas incertezas e com utilização de holografia eletrônica como no trabalho de pesquisa desenvolvido na medição de tensões residuais pelo método do furo cego, no LABMETRO(UFSC/Florianópolis) [2]. Como a incerteza do resultado depende fortemente do nível de tensão introduzido pelo processo de furação e é também dependente da capacidade do processo de furação de produzir geometrias bem

definidas e com repetibilidade, nenhum desses requisitos pode ser deixado de lado na escolha do processo de furação a ser utilizado.

Os processos de usinagem com remoção de cavacos que melhor atendem à característica de baixo nível de tensões residuais geralmente não são satisfatórios quanto à forma do furo, e quanto à não-introdução de novas tensões residuais. Além disto, os processos de usinagem com remoção de cavacos são limitados aos materiais de peça compatíveis com os materiais de ferramentas. O quadro 1 mostra que alguns dos processos de usinagem são mais adequados quanto à exigência de introdução de mínimas tensões residuais do que os processos convencionais. Este fato pode ser notado no quadro 1 quando da comparação dos valores das tensões residuais induzidas no material por cada um dos processos avaliados neste, ainda são apresentadas as modificações no material como a zona afetada pelo calor (HAZ), rugosidade, alteração da dureza, deformação plástica, modificações estruturais, e irregularidade superficial. Os dados apresentados no quadro 1 são em profundidade máxima observada dos efeitos no material.

Dentre estes processos destaca-se a usinagem eletroquímica (ECM- Electrochemical Machining), por, teoricamente, não promover a introdução de novas tensões residuais à peça [1,3,4,5,6,7,8,10].

O processo de usinagem eletroquímica, (ECM), é um processo não tradicional de usinagem, baseado em estudos desenvolvidos por Michel Faraday (1791 - 1867), onde se utiliza o princípio da dissolução anódica para promover a remoção de material de uma peça [3,4,5,6]. O aprimoramento da usinagem eletroquímica foi principalmente ao desenvolvimento das indústrias de alta tecnologia, como a aeroespacial, médica e automobilística, onde os novos materiais utilizados e as peças de geometria complexa exigiam novas técnicas de fabricação [3,4,5,6].

Tipos de Alterações no Material	Profundidade Máxima observada do efeito para a Operação de Usinagem (mm)*											
	Ferramenta Cortante		Abrasiva		Química		Eletro Química		Eletroerosão		Feixe Laser	
	Desb.	Fino	Desb.	Fino	Desb.	Fino	Desb.	Fino	Desb.	Fino	Desb.	Fino
Comum para todos materiais	Def. Plástica arrancam. mat.		Deformação Plástica		Ataque Seletivo Ataque Intergranular				Microtrincas Resolidificação			
Aços temperados e Inox Martensítico	Microtrincas Modificação da quant. martensita								Modificação da quantidade Martensita			
DeformaçãoPlástica	0,12	0,02	0,09	0,01	-		-	-	-	-	-	-
Alteração Dureza	0,5	0,025	0,25	0,04	0,08	0,025	0,05	0,036	0,203	0,025	0,127	0,025
Superfície Irregular	0,08	0,02	0,01	0,005	0,04	0,02	0,06	0,01	0,04	0,01	0,02	0,005
HAZ	0,08	0,04	0,3	0,02	-	-	-	-	0,127	0,025	0,127	0,025
Rugosidade	0,006	0,002	0,002	-	0,006	0,006	0,003	0,0002	0,004	0,002	0,006	0,001
Tensões Residuais induzidas < 10 % tensão escoam.	0,4	0,15	0,3	0,01	0,025	-	0,0	0,0	0,08	0,05	0,015	0,05

\* normal à superfície

- dados insuficientes

### QUADRO 1 - Comparação entre diferentes processos de usinagem através de seus efeitos. [1]

A usinagem eletroquímica possui algumas características vantajosas sobre os outros processos de usinagem que são: a ausência de aporte de energia mecânica ou térmica sobre a peça, a usinabilidade independente do tratamento termo-mecânico e das características físicas do material e principalmente a não-introdução de tensões residuais na peça. Mas a dificuldade da usinagem eletroquímica é relacionada com a geometria do furo resultante, bem como dependendo do eletrólito utilizado, pelas dificuldades de segurança do operador e integridade física da peça [1,8,9,10]. Este trabalho promove uma averiguação da adequação da usinagem eletroquímica para a execução de furos, visando a medição de tensões residuais pelo método do furo cego, com a utilização de eletrólitos pouco agressivos, ao operador e à peça, procurando-se atingir as condições necessárias relativas à forma geométrica do furo.

Para a realização do trabalho foi necessário o desenvolvimento de equipamento para a execução dos furos por usinagem eletroquímica. No desenvolvimento deste equipamento procurou-se adequá-lo às necessidades do método do furo cego, ou sejam, facilidade de utilização, portabilidade e segurança de operação. Visando a economia de recursos e tempo foram utilizados materiais e equipamentos reaproveitados de equipamentos já desativados ou já existentes no Laboratório de Mecânica de Precisão- LMP (UFSC-Florianópolis). Como eletrólito foi utilizado um eletrólito seguro, de fácil obtenção e de baixo custo, no caso o cloreto de sódio, NaCl, também conhecido popularmente como sal de cozinha.

Após o desenvolvimento do equipamento procedeu-se a execução dos furos com diâmetro utilizado em medição de tensões pelo método do furo cego, menores que 1,6 mm, com a finalidade de verificar as condições geométricas obtidas e a possível adequação dos mesmos para a medição de tensões pelo método do furo cego.

Na seqüência do trabalho é feita uma abordagem do processo de usinagem eletroquímica, que viabiliza um projeto embasado no estado atual de desenvolvimento da tecnologia de usinagem eletroquímica, destacando uma fundamentação teórica, o desenvolvimento do equipamento de usinagem eletroquímica e a verificação da adequação dos furos obtidos por usinagem eletroquímica à utilização em medição de tensões residuais pelo método do furo cego. Estes tópicos distribuem-se, neste trabalho, da seguinte forma:

No capítulo 2 apresenta-se os objetivos deste trabalho, visando a compreensão das decisões tomadas durante as fases de desenvolvimento do equipamento e execução dos ensaios.

No capítulo 3 é apresentado um resumo sobre o método do furo cego para medição de tensões residuais, embasando assim as decisões tomadas relativas à adequação dos furos obtidos por usinagem eletroquímica às características necessárias ao método do furo cego.

No capítulo 4 é feito o resumo da teoria básica sobre o processo de usinagem eletroquímica e é apresentado o estado da arte em furação eletroquímica.

No capítulo 5 apresentam-se as características do equipamento de usinagem eletroquímica, embasando assim o desenvolvimento deste equipamento.

No capítulo 6 é realizada a descrição do desenvolvimento experimental do equipamento de usinagem eletroquímica e da infra-estrutura utilizada durante os ensaios.

No capítulo 7 é feita a apresentação dos resultados obtidos pelo equipamento de usinagem eletroquímica na obtenção dos furos, fazendo-se a comparação das características obtidas com as características adequadas à medição de tensões residuais pelo método do furo cego.

No capítulo 8, apresentam-se as observações e conclusões finais do trabalho e sugestões para novos trabalhos nesta área de pesquisa.

E finalmente, nos capítulos 9 e 10, apresentam-se a bibliografia utilizada para o desenvolvimento do trabalho e os anexos com as características de alguns dos equipamentos utilizados, o cálculo da TRM do material utilizado e a tabela dos resultados obtidos.



## **CAPÍTULO 2**

### **OBJETIVOS**

Este trabalho tem como objetivo verificar a adequação do processo de usinagem eletroquímica na obtenção de furos de pequeno diâmetro, até 2,0 mm, visando a utilização dos mesmos na medição de tensões residuais pelo método do furo cego. Para se atingir o objetivo é necessário desenvolver os seguintes tópicos:

1. Definir as necessidades e características do furo para sua perfeita adequação à utilização em medição de tensões residuais pelo método do furo cego, e, assim, determinar critérios de avaliação dos resultados.
2. Analisar a teoria existente sobre a usinagem eletroquímica para a determinação de quais as melhores condições de se obter o furo, determinando-se os parâmetros, acessórios e método de utilização adequados.
3. Desenvolver um equipamento de usinagem eletroquímica para a obtenção dos furos. Para o desenvolvimento deste equipamento devem ser levados em consideração os seguintes fatores: facilidade de transporte, facilidade de uso, segurança do operador e instalações.

4. Através da obtenção dos furos, verificar a adequação ou não do processo de usinagem eletroquímica à execução de furos visando a medição de tensões residuais pelo método do furo cego.

5. Formação de recursos humanos no processo de usinagem eletroquímica possibilitando assim a sua utilização para outras aplicações.

## **CAPÍTULO 3**

### **MÉTODO DO FURO CEGO PARA A DETERMINAÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS**

As tensões internas que existem em corpos que estão em repouso, ou seja, em estado de equilíbrio e sujeitos a condições uniformes de temperatura, na ausência de carregamentos externos e de forças de massa são denominadas de tensões residuais. Podem surgir em qualquer material ou componente devido ao processo de fabricação ou posterior tratamento e dificilmente podem ser previstas com exatidão [1].

O conhecimento da existência e do valor de tensões residuais, em peças de aplicação de engenharia, é um fator de segurança para evitar-se problemas de acidentes e desastres. Nas situações de risco de acidentes, o conhecimento das tensões residuais pode prever a substituição preventiva de peças com problemas de fadiga e, com o conhecimento do estado de tensões residuais, otimizar projetos, reduzindo peso e custo [1].

A determinação do nível de tensões residuais existentes em um corpo é possível por diversos métodos. Estes se dividem em métodos numéricos, analíticos ou experimentais. Entre os experimentais se destaca o método do furo cego, que é o mais utilizado.

O método do furo cego é considerado um dos melhores métodos de medição de tensões residuais. O princípio quantitativo foi utilizado pela primeira vez por J. Mathar em 1934. Das técnicas de medição utilizadas conjuntamente com o método do furo cego, uma das que se destacam é a holografia [1, 2,11].

O princípio do método do furo cego é baseado na modificação do estado de tensão interna de uma peça, pela execução de um furo. Em consequência do alívio de tensões provocado pelo furo, o resultado deste alívio se manifesta através de deslocamentos e deformações na superfície ao redor do furo. É importante que o processo de furação seja muito bem controlado para impedir que novas tensões residuais sejam introduzidas pelo processo de furação[1, 2, 11].

É a área da peça onde é realizada a amostragem do campo de tensões, portanto, que exerce influência no resultado de medição e depende do diâmetro e da profundidade do furo.

É possível a realização de medições muito localizadas como uso de furos de pequenos diâmetros, entre 1,5 a 3,5 mm, com a profundidade entre igual ou 20% superior do diâmetro para campos de tensão uniforme e de profundidade de no máximo de 50% do diâmetro do furo para campos de tensão não uniformes.

A geometria do furo é uma fonte de erro do método do furo cego. O furo deve possuir as características: apresentar fundo plano, ser cilíndrico, ser perpendicular à superfície da peça e ter profundidade entre 1:1 até 1:1,2 quando esta é obtida num único incremento, e diâmetro com o valor do raio conhecido com incerteza não superior a 0,7% [1, 2]. Para o método incremental de furação, visando medir tensões residuais não uniformes ao longo da profundidade, este deve ser controlado da forma mais precisa possível. Pequenos erros na profundidade dos incrementos podem vir a ocasionar grandes erros no cálculo das tensões. No caso de fundos esféricos pode-se desenvolver coeficientes de correção. O quadro 2 detalha as fontes de erros quanto a origem, causa, efeito e valor recomendado. O quadro se limita a apresentar estes valores para o processo de obtenção dos furos, para a geometria do furo e para erros de medição do furo [1].

PRINCIPAIS FONTES DE ERROS NA TÉCNICA DO FURO CEGO PARA MEDIÇÕES DE TENSÕES RESIDUAIS					
ORIGEM	ESPECIFICAÇÃO	CAUSA	EFEITO	VALOR RECOMENDADO	COMENTÁRIO
TÉCNICA DE FURAÇÃO	tensões induzidas na furação	processo de furação inadequado	tensões residuais induzidas superpostas as existentes	< 3% da tensão residual a medir	ECM não introduz tensões residuais
	excentricidade do furo com relação à roseta	excentricidade ou folgas radiais da guia de furação	3% por 0,025 mm de erro de alinhamento	< 0,03 mm	a orientação não é afetada apenas a magnitude
GEOMETRIA DO FURO	variação na forma do furo	folgas radiais do dispositivo de furação e vibração da ferramenta	3% por 0,015 mm de erro na circularidade (0,9%)	erro de circularidade < 0,015 mm	
	perpendicularismo	desalinhamento do dispositivo de furação	alívio de tensões complexo, 17% erro para +/- 15°	+/- 2,5° (erro de 5% nas tensões)	
MEDIÇÃO DO FURO	medição do diâmetro do furo	variação no diâmetro da ferramenta e dificuldade de medição devido rebarbas	3 % por 0,025 mm de incerteza no diâmetro(1,6mm) ou 5% erro por 3% erro no diâmetro	< 0,025 mm	a orientação não é afetada, a ECM não produz rebarba
	profundidade do furo, incerteza na determinação da profundidade	folgas axiais do dispositivo de furação e incerteza do sistema de medição	3,5% por 8% de erro na determinação da profundidade	menor do que 1,2x o diâmetro do furo e incremento mínimo > 0,05mm	

**QUADRO 2 - Principais fontes de erro na técnica do furo cego para medição de tensões residuais [1]**

## **CAPÍTULO 4**

### **USINAGEM ELETROQUÍMICA**

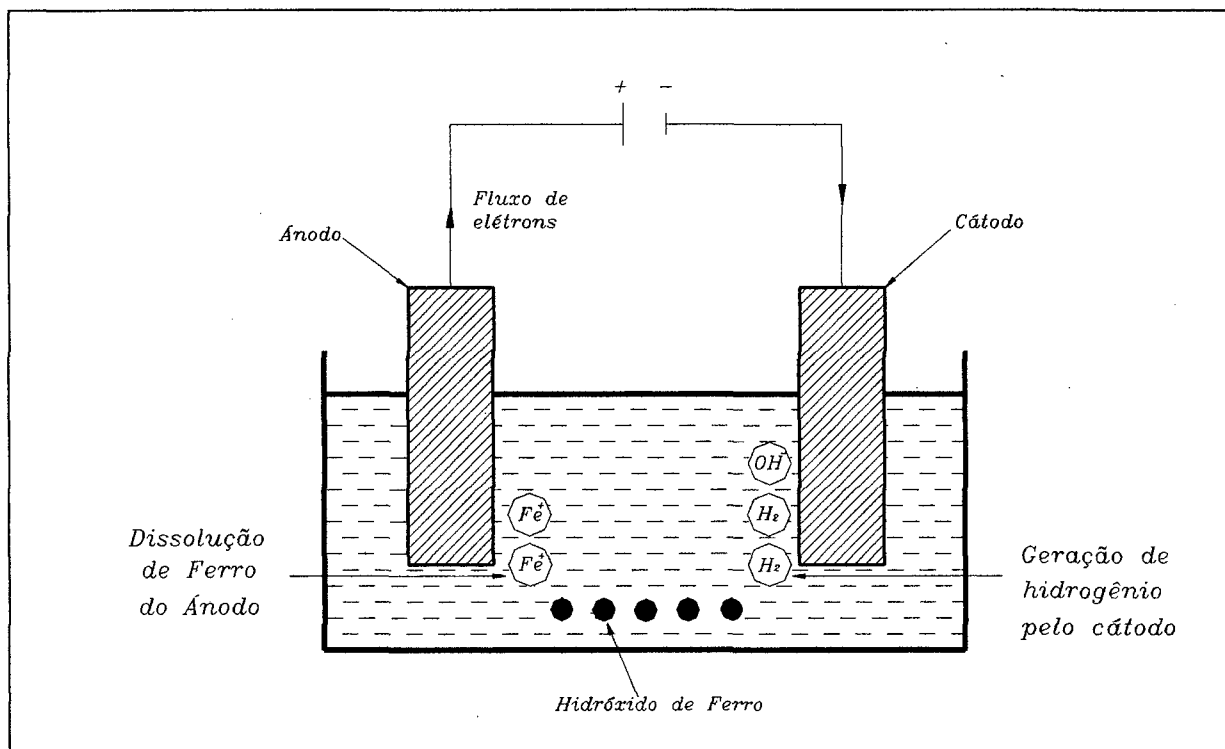
#### **4.1 HISTÓRICO**

A usinagem eletroquímica é um processo eletrolítico no qual a remoção metálica é realizada através de dissolução anódica de uma peça de trabalho polarizada anodicamente em relação à ferramenta (Figura 1). A usinagem eletroquímica é a aplicação direta das Leis de Michel Faraday (1791-1867), que também descreve o processo de revestimento eletrolítico de metais através da aplicação da corrente elétrica (DC) [3,4,5,6,7,8,12,13,14].

O primeiro registro de patente de um processo semelhante ao que é hoje a usinagem eletroquímica foi solicitado em 1929 por Gussef [7]. O desenvolvimento mais significativo do processo só começou a ocorrer a partir da década de cinquenta, quando a usinagem eletroquímica começou a ser estudada como um método de trabalhar ligas de alta resistência, ligas resistentes ao calor e outras de alta dificuldade de serem usinadas pelos meios disponíveis na época. Atualmente a usinagem eletroquímica é empregada em indústrias de alta tecnologia, como a aeroespacial, automobilística, médica, “offshore”, etc. [3,5,6,7,8].

Apesar das vantagens apresentadas pelo processo de usinagem eletroquímica tais como a não introdução de tensões residuais à peça, a ausência de aporte de energia térmica ou mecânica durante o processo, a capacidade de trabalhar com materiais de baixa usinabilidade pelos meios tradicionais de usinagem (fresamento,

torneamento, etc.), não ocorre uma utilização mais intensa do processo de usinagem eletroquímica devido aos seguintes fatores: equipamento caro; custo elevado para o desenvolvimento do ferramental necessário à usinagem; a dificuldade de acesso à tecnologia existente sobre o processo, possibilidade de se usinar apenas materiais condutores de eletricidade; alto custo energético por unidade de volume removido.



**FIGURA 1** - Representação esquemática do processo de dissolução anódica em uma solução eletrolítica [7]

A questão da poluição ambiental, no entanto, é um dos fatores limitantes na implantação do processo de usinagem eletroquímica tendo em vista o elevado volume de dejetos resultantes do processo que, algumas vezes, além do risco à integridade ambiental também podem comprometer a saúde humana [3,4,5,6,7,8,10].

Com o desenvolvimento do processo de dissolução anódica para o trabalho de metais surgiram várias formas de aplicação deste processo como, pôr exemplo [3,5,8,13,14]:

- usinagem eletroquímica, ECM (ElectroChemical Machining), processo no qual a retirada de material ocorre através da combinação de dissolução anódica com a penetração da ferramenta na peça. Este processo possui diversas variações de acordo com o tipo de ferramenta e movimento da ferramenta utilizado, por exemplo fresamento, trepanação e principalmente, o cerne deste trabalho, a furação eletroquímica, ECD (ElectroChemical Drilling). A Figura 2 apresenta uma representação esquemática do processo de furação eletroquímica onde aparecem os diversos componentes de um equipamento de usinagem eletroquímica tais como, fonte de energia, ferramenta, peça, sistema de eletrólito (reservatório, bombas, etc) entre outros de menor importância.

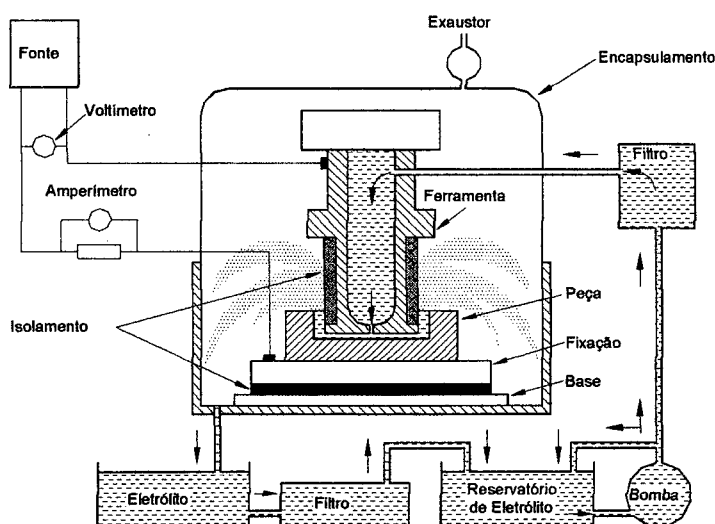


FIGURA 2 - Representação esquemática do processo de furação eletroquímica, ECD



- rebarbação eletroquímica, ECDB (ElectroChemical Deburring), processo de retirada de rebarbas metálicas pela ação do princípio de dissolução anódica, sendo utilizado também para arredondamento de arestas da peça.
- torneamento eletroquímico, ECT (ElectroChemical Turning), processo que promove a aplicação do princípio de dissolução anódica através da retirada de material de peças rotativas, conseguindo-se realizar cortes periféricos e faciais.
- retificação eletroquímica, ECG (ElectroChemical Grinding), processo que combina ação mecânica e dissolução eletroquímica para a remoção de materiais, duros ou frágeis. Devido à natureza eletroquímica do processo não há a produção de rebarbas, geração de calor, distorções ou introdução de tensões.

## 4.2 DISSOLUÇÃO ANÓDICA

Os princípios básicos da dissolução anódica levam em consideração as Leis de Faraday e a Lei de Ohm [3,4, 5,6,7,8,13,14]. As Leis de Faraday estabelecem que:

1 - A quantidade de qualquer substância depositada ou dissolvida é proporcional à quantidade de cargas elétricas que fluem pelo sistema.

2 - A quantidade de diferentes substâncias depositadas ou dissolvidas pela mesma quantidade de cargas elétricas é proporcional a seus pesos químicos equivalentes.

A formulação matemática das leis de Faraday é;

$$m = \frac{N}{F \cdot z} It \quad (1)$$

Quando o produto  $It$  é unitário, define-se o equivalente eletroquímico do material,  $E$ , como;

$$E = \frac{N}{zF} \quad (2)$$

Para o volume total de material dissolvido,  $v$ , tem-se;

$$v = v_{sp} \cdot t \quad (3)$$

onde  $v_{sp}$  é definido como sendo o fator de proporcionalidade para o volume de material dissolvido e a carga transportada;

$$v_{sp} = \frac{N}{z \cdot \rho \cdot F} \quad (4)$$

Quando o material usinado é uma liga com vários elementos  $I_1, I_2, \dots, I_n$  com composição percentual de massa  $p_1, p_2, \dots, p_n$  e pesos atômicos  $a_1, a_2, \dots, a_n$  então podemos estabelecer o fator de proporcionalidade  $v_{spl}$  por superposição das dissoluções individuais;

$$v_{spl} = \frac{1}{\rho \cdot l_{eq}} \sum_{i=1}^n \frac{p_i}{100} \frac{a_i}{n_i} \frac{1}{F} \quad (5)$$

As Leis de Ohm relacionam a corrente elétrica, a diferença de potencial e a resistência elétrica e são descritas pelas equações 6 à 9.

$$I = \frac{V}{R} \quad (6)$$

$$R = \frac{h \cdot \rho}{A} \quad (7)$$

$$I = \frac{V \cdot A}{\rho \cdot h} \quad (8)$$

$$J = \frac{I}{A} = \frac{V}{\rho \cdot h} = \frac{kV}{h} \quad (9)$$

Da combinação destas leis podemos determinar teoricamente as taxas de remoção e a velocidade de avanço da ferramenta;

- Taxa de remoção de material,  $\dot{v}$ ;

$$\dot{v} = v_{sp} I \quad (10)$$

- Velocidade de avanço da ferramenta

$$v_f = v_{sp} \cdot J \quad (11)$$

A taxa de remoção eletroquímica do material depende somente das características do material e da corrente. Pode-se construir quadros com taxas de remoção teórica para cada material. O quadro 3 apresenta as taxas de remoção para alguns dos metais puros mais importantes empregados na engenharia [7,14].

METAL	PESO ATÔMICO g	VALÊNCIA	DENSIDADE g/cm <sup>3</sup>	TAXA DE REMOÇÃO I = 1000A	
				g/min	cm <sup>3</sup> /min
ALUMÍNIO	26,98	3	2,71	5,59	2,06
CÁDMIO	112,4	2	8,67	34,93	4,1
CROMO	51,896	2	7,20	16,18	2,25
		3		10,81	1,51
		6		5,37	0,75
COBALTO	58,93	2	8,92	18,3	2,05
		3		12,25	1,38
NIÓBIO	92,906	3	8,59	19,28	2,16
		4		14,52	1,69
		5		11,57	1,34
COBRE	63,546	1	8,97	39,46	4,39
		2		19,73	2,20
FERRO	55,847	2	7,86	17,39	2,21
		3		11,57	1,47
MAGNÉSIO	24,312	2	1,75	7,56	4,43
MANGANÊS	54,938	2	7,48	17,09	2,28
		3		11,34	1,48
		4		8,54	1,15
		6		5,67	0,77
		7		4,91	0,65
MOLIBDÊNIO	95,94	3	10,22	19,88	1,95
		4		14,89	1,47
		6		9,98	0,98
NÍQUEL	58,71	2	8,92	16,22	2,11
		3		12,17	1,36
TITÂNIO	47,90	3	4,52	9,90	2,19
		4		7,48	1,65
TUNGSTÊNIO	183,85	6	19,31	19,05	0,98
		8		14,29	0,74
VANÂDIO	50,942	3	6,09	10,58	1,74
		5		6,35	1,05
ZINCO	65,37	2	7,15	20,34	2,85

**QUADRO 3** - Taxas teóricas de remoção de material para usinagem eletroquímica de metais puros assumindo eficiência de corrente 100% [7, 14]

### 4.3 COMPORTAMENTO ANÓDICO DOS METAIS

Para a compreensão do comportamento anódico dos metais deve-se definir o que é densidade de corrente, eficiência de corrente e potencial anódico.

- Densidade de corrente,  $J$ , é definida pela lei de Ohm como sendo a intensidade de corrente que flui pelo sistema dividida pela área efetiva de trabalho. A área efetiva de trabalho é definida como sendo a área projetada do eletrodo sobre a peça de trabalho (Figura 3). Expressando matematicamente [3,7,8,10], temos:

$$J = \frac{I}{A} \quad (9)$$

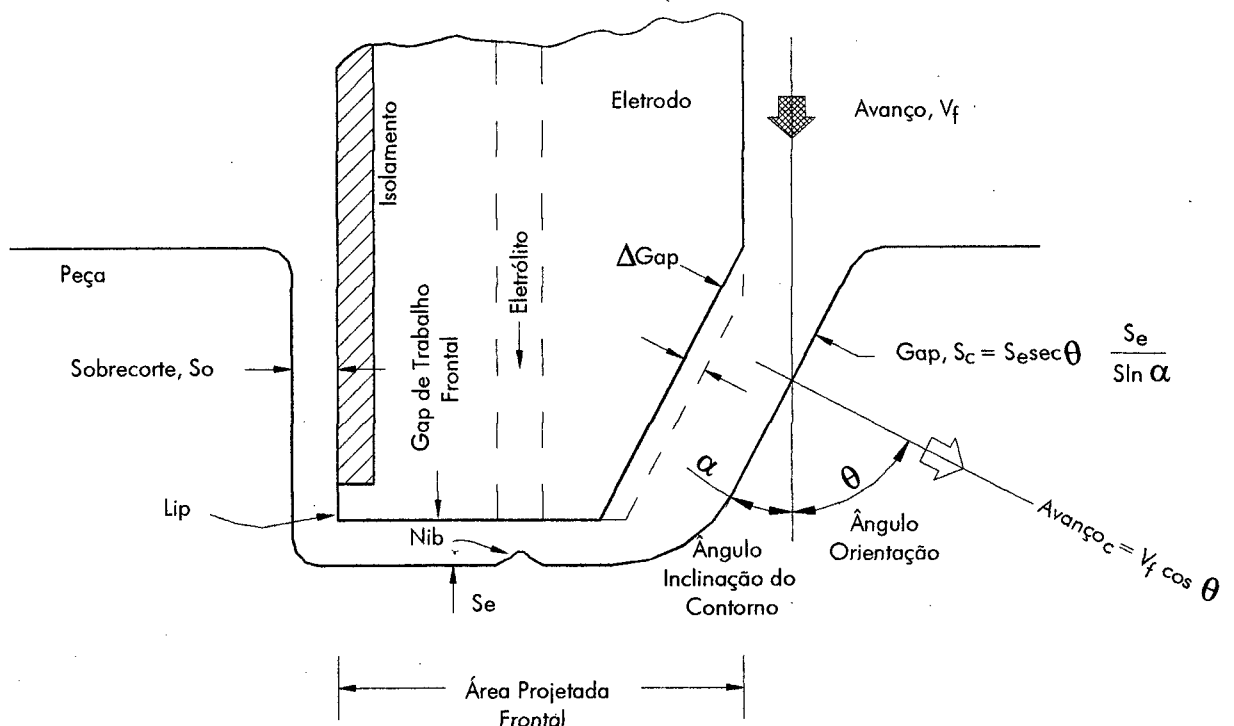


FIGURA 3 - Definição da área projetada de trabalho [14]

• Eficiência de corrente,  $\eta$ , é definida como sendo a diferença entre a quantidade observada de metal dissolvido e a quantidade teórica predita pelas leis de Faraday, para as mesmas condições de equilíbrio eletroquímico, corrente, etc.

$$\eta = \frac{v_R}{v} \cdot 100 \quad (12)$$

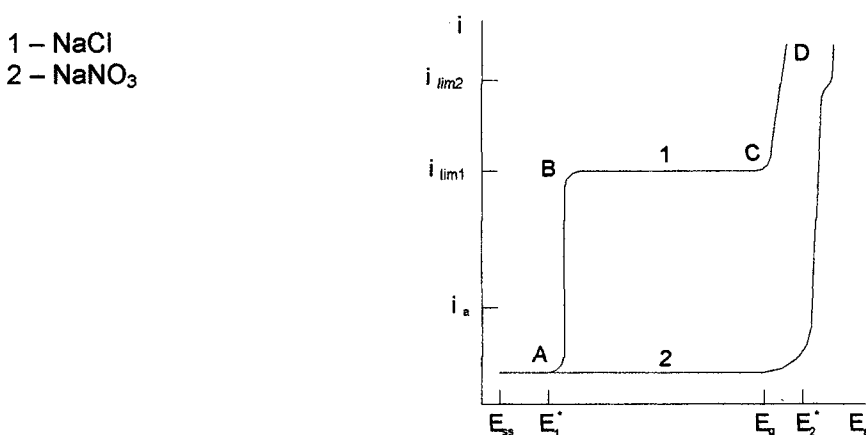
Para um rendimento  $\eta$  de 100% toda a corrente que flui pelo sistema é utilizada no processo de eletrodissolução anódica do metal e para um rendimento  $\eta$  de 0% toda a corrente que flui pelo sistema não causa dissolução do metal [3,4,5,6,7,8,9,10].

A eficiência de corrente pode ser afetada por vários fatores, tais como:

- a valência dos íons pode variar de solução eletrolítica para solução eletrolítica, dependendo da tensão aplicada;
- os valores estimados para os equivalentes eletroquímicos de ligas podem estar errados;
- a passivação modifica a eficiência de corrente pela redução da taxa de remoção de material;
- ataques de contornos de grão levam a valores alterados do rendimento, para maior, devido ao possível arrancamento de grãos pela força do fluxo de solução eletrolítica sobre os contornos enfraquecidos;
- a evolução gasosa no ânodo também pode levar a valores errôneos de eficiência de corrente.

Logo, para um mesmo material e arranjo das condições de processo pode-se obter diferentes taxas de eficiência de corrente apenas substituindo-se a solução eletrolítica [3,4,5,6,7,8,10,14].

• Potencial anódico,  $E_a$ , consiste na diferença de potencial existente na superfície anódica [7,10,16]. O estudo do comportamento anódico dos metais irá concentrar-se apenas no comportamento do ferro e suas ligas. Na Figura 4, duas curvas de polarização típicas são mostradas. Estas ilustram o comportamento anódico do ferro em uma solução eletrolítica de NaCl na curva 1 e do  $\text{NaNO}_3$  na curva 2 [10].



**FIGURA 4 -** Curvas de Polarização para o Fe em Solução Eletrolítica de NaCl  
[10]

Antes de ser acionada uma fonte de potência externa, o metal imerso na solução eletrolítica está em um estado de potencial fixo  $E_{ss}$ , que é atribuído à diferença de eletronegatividade entre os eletrodos [10]. Quando a fonte é acionada o potencial de eletrodo é deslocado na direção positiva de  $E_{ss}$  para  $E_1^*$ . Neste potencial ainda não temos a dissolução do ânodo em virtude da passivação anódica do metal. Após  $E_1^*$  haver sido atingido, a densidade de corrente cresce abruptamente devido à ativação aniônica do ânodo, a região AB da curva. Uma fase importante do processo de ativação é a adsorção dos íons passivantes  $\text{OH}^-$  da superfície anódica pelos ânions de ativação da solução eletrolítica  $\text{Cl}^-$ . Quando se emprega uma solução

eletrolítica a base de sal de cozinha ( $\text{NaCl}$ ) na superfície do ânodo de ferro se formam cloretos de ferro, que são dissolvidos na solução. Estes cloretos dissolvidos reagem com a hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) formando hidróxidos metálicos não solúveis e liberando os íons de  $\text{Cl}^-$  para uma nova reação na superfície metálica.

O processo de ativação pode ser retardado pela presença de filmes óxidos. A ruptura destes filmes, pela presença de microtrincas, impurezas de melhor condutibilidade elétrica ou outros defeitos superficiais propicia a ativação anódica tornando estes pontos em centros da ativação anódica. Com o tempo a superfície ativada do ânodo se expande até a totalidade da superfície do ânodo e o metal passa a se dissolver no estado ativado [7, 10].

A taxa de dissolução do metal cessa de crescer quando se atinge o valor limite de densidade de corrente,  $J_{\text{lim}}$ , dentro da região BC da Figura 4. Este valor,  $J_{\text{lim}}$ , se mantém constante devido à limitação criada pela remoção dos íons metálicos formados na solução eletrolítica. Quando os produtos da dissolução anódica do metal alcançam o valor limite de solubilidade, estes formam um depósito na superfície do eletrodo. Devido a este depósito de sal na superfície do eletrodo e da máxima concentração na solução eletrolítica, o metal está em um estado passivo na região BC, e esta passivação é chamada de 'passivação induzida pelo sal'. Mas a densidade de corrente não decresce para baixos valores, na região BC, devido ao fato de ser necessária para manter uma concentração suficientemente alta da solução salina na superfície do eletrodo. Em consequência, o valor de  $J_{\text{lim}}$  decresce com o aumento da concentração da solução eletrolítica. Este decréscimo é proporcional à diminuição da solubilidade dos produtos da reação [7, 10].

Na usinagem eletroquímica o valor de  $J_{\text{lim}}$  pode ser aumentado várias vezes pela agitação da solução eletrolítica, em virtude de este estar relacionado com a



difusão dos íons da solução eletrolítica. Esta remoção de passividade por vigorosa agitação da solução eletrolítica é conhecida como depassivação convectiva.

Na região CD da curva de polarização os valores de potencial anódico caem e os valores de corrente crescem, sendo que nesta mesma região ocorre a evolução de oxigênio. O crescimento da corrente ocorre não só devido à evolução do oxigênio mas, principalmente, devido ao aumento da taxa de ionização do metal. O depósito salino existente na região anterior desaparece, o que pode ser verificado através da análise em microscópio. O crescimento da taxa de dissolução do metal dentro da região CD pode ser atribuído a uma agitação vigorosa da solução eletrolítica pela evolução gasosa ou pelo aumento da temperatura da superfície do eletrodo que, atingindo o valor crítico, induz uma ativação térmica do ânodo [7,10,16].

Após a dissolução anódica o metal apresenta uma superfície que difere em acabamento de uma região da curva de polarização para outra. Na região AB, a região ativa, o metal também é erodido. Devido à taxa de dissolução ativa depender do plano cristalino e da geometria deste plano a rugosidade é elevada ("etched"). Dentro da região BC, a superfície apresenta-se polida, mas as taxas de dissolução são muito baixas. A dissolução anódica dentro da região CD resulta em superfícies polidas, porém com defeitos macroscópicos típicos na forma de linhas finas, ou estriamentos, na direção do fluxo da solução eletrolítica. Estes estriamentos têm origem no fato da dissolução anódica dentro da região CD ser acompanhada por transferência de massa nas camadas mais próximas do eletrodo pela solução eletrolítica. Portanto, qualquer perturbação local no fluxo de solução eletrolítica pode influenciar uma mudança local na taxa de dissolução do metal [10,16].

O valor de  $J_{lim}$  é determinado pela taxa de remoção dos produtos da dissolução anódica através da camada-contorno de difusão e depende da espessura,

$\delta$ , desta camada. Como  $\delta$  aumenta ao longo da superfície anódica, na direção do fluxo da solução eletrolítica,  $J_{lim}$  diminui na mesma direção.

Para determinados valores de densidade de corrente, taxa de fluxo da solução eletrolítica e dimensões do ânodo, pode surgir uma situação em que a densidade de corrente de trabalho,  $J_w$ , é menor que  $J_{lim}$  em uma região da superfície do eletrodo e maior que  $J_{lim}$  em uma região adjacente a esta. Assim, uma região da superfície do eletrodo irá dissolver na região ativa da curva de polarização e outra região em correntes que excedem o valor limite. Esta diferença entre regimes de dissolução pode ter sérias conseqüências. Primeiro, a superfície do ânodo não é completamente equipotencial. Temos pontos diferentes da curva de polarização atuando sobre a superfície anódica. Segundo, o metal terá taxas diferentes de dissolução sobre a superfície anódica e, em terceiro lugar, haverá diferenças na rugosidade média entre diferentes pontos da superfície anódica [10,16].

A curva de polarização 2 na Figura 4 mostra o comportamento anódico do ferro e suas ligas em soluções eletrolíticas de  $\text{NaNO}_3$  ou  $\text{NaClO}_3$ . A principal diferença da discussão acima em relação à curva para o  $\text{NaCl}$  é o fato de praticamente não ocorrer dissolução anódica do metal sobre uma larga faixa de potencial que estende-se de  $E_{ss}$  até  $E^*_{12}$  e ao redor da faixa  $E_g$ - $E^*_{12}$  ocorrer a evolução do oxigênio no metal passivo. Nesta região a densidade de corrente para ocorrer a evolução do oxigênio é alta (da ordem de alguns Ampères/centímetro quadrado,  $\text{A/cm}^2$ ).

A ativação aniônica anódica nas soluções eletrolíticas à base de  $\text{NaNO}_3$  e  $\text{NaClO}_3$  necessita de um alto potencial anódico  $E^*_{12}$ , maior que o potencial no qual a água começa a se decompor com a evolução do oxigênio,  $E_g$ . Após se atingir o potencial de ativação  $E^*_{12}$  a evolução do oxigênio decresce e tem início uma alta taxa de dissolução anódica do metal. As curvas de polarização parciais para a ionização do

metal e evolução do oxigênio do caso acima são mostradas na Figura 4 ao longo de toda a curva de polarização.

#### 4.4 COMPORTAMENTO DE REMOÇÃO

De acordo com a primeira lei de Faraday a quantidade de matéria transportada em uma reação eletroquímica é proporcional à carga elétrica envolvida. Dentro deste contexto, para uma reação de dissolução metálica eletroquímica pura em um sistema com distribuição de densidade de corrente homogênea pode-se formular uma relação entre a densidade de corrente ( $J$ ) e a velocidade de remoção de material ( $v_a$ ) [3,4,5,6,7,10,11].

$$v_a = v_{sp} \cdot J \quad (13)$$

$$v_{sp} = \frac{v_a}{J} \quad (14)$$

onde  $v_{sp}$  é constante e pode ser determinado através da equação 4

$$v_{sp} = \frac{N}{z \cdot \rho \cdot F} \quad (4)$$

Muitas vezes pode-se encontrar diferenças consideráveis entre o valor de  $v_{sp}$  calculado teoricamente pela equação 4 e o valor encontrado experimentalmente, como quociente entre velocidade de remoção e densidade de corrente. Este fato é

devido as condições de trabalho não serem exatamente as pressupostas na lei de Faraday e a fatores como a remoção de partículas pouco solúveis do material.

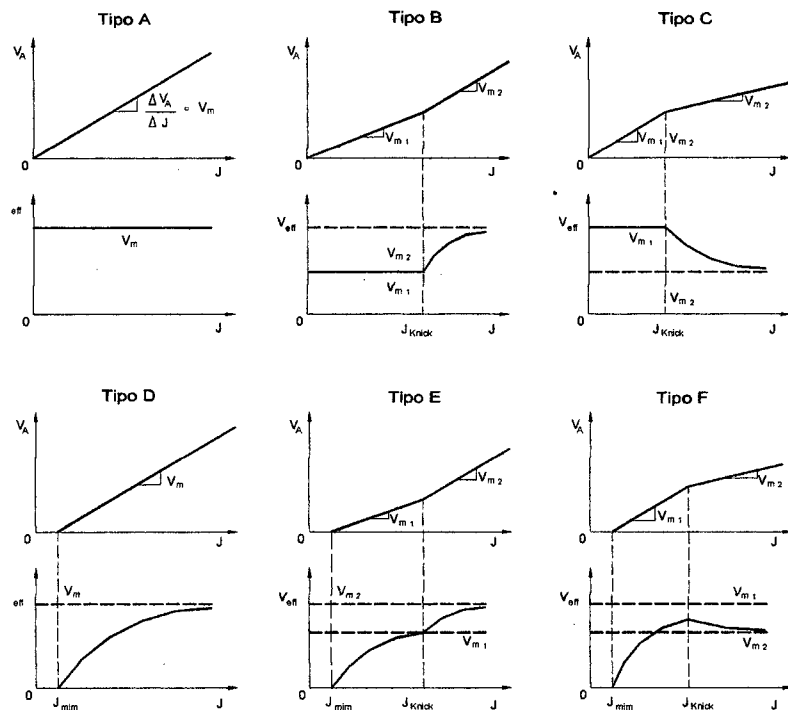
Define-se o valor removido efetivo,  $v_{ef}$ , como o valor que descreve a dependência real entre a velocidade de remoção,  $v_a$ , e a densidade de corrente,  $J$ .

Assim:

$$v_a = v_{ef} \cdot J \quad (15)$$

A determinação da dependência experimental entre a velocidade de remoção e a densidade de corrente, permite a determinação do volume removido efetivo e a comparação deste com os valores  $v_a \times J$  calculados, permite algumas conclusões sobre o tipo das reações de remoção.

A análise das dependências  $v_a \times J$  mostra algumas características marcantes que permitem concluir sobre poucas possibilidades de reação. Basicamente todas as dependências  $v_a \times J$  podem ser substituídas por retas ou segmentos de retas. Se para cada aumento da densidade de corrente observa-se um aumento da velocidade de remoção independente da densidade de corrente, isto permite concluir que no intervalo deste comportamento linear a remoção ocorre pôr um determinado mecanismo. Uma deflexão da reta indica a mudança do mecanismo de remoção, visto que um aumento da densidade de corrente após esta deflexão leva a um aumento diferenciado da velocidade de remoção. Na seqüência apresentam-se os comportamentos das retas decorrentes das análise dos resultados das curvas características  $v_a \times J$  e discute-se sua influência sobre as reações de remoção. (vide Figura 5)



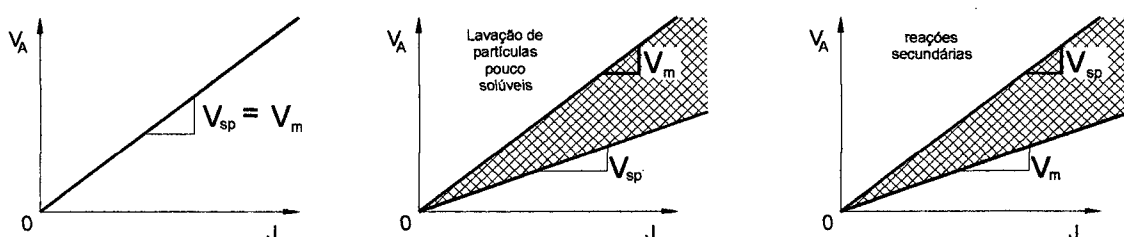
**FIGURA 5 - Tipos de comportamento de remoção [3,4]**

#### 4.4.1 Comportamento de remoção do tipo A

O comportamento de remoção do tipo A, ver Figura 5, apresenta uma proporcionalidade direta entre a velocidade de remoção e a densidade de corrente, o que indica um mecanismo de remoção único que independe da densidade de corrente. Assim os seguintes mecanismos de remoção (Figura 6), são possíveis: [3,4]

- A reação de dissolução ocorre com valência invariável. O volume removido específico,  $v_{ef}$ , corresponde à inclinação  $V_m$ .
- Além das reações de dissolução, partículas insolúveis são lavadas para fora da matriz. O volume específico calculado é menor que o indicado pela inclinação  $V_m$ .

- Além da reação de dissolução, ocorrem uma ou mais reações secundárias, sem efeito sobre a remoção, que, no entanto, estão em perfeito equilíbrio com a reação de remoção. Ou seja, a relação entre as reações que não participam na remoção e a reação de remoção é constante e independe da densidade de corrente. O volume calculado do volume específico de remoção é menor que o indicado pela inclinação  $V_m$ .
- Ocorrem tanto reações que participam, como reações que não participam na remoção, em perfeito equilíbrio. Além disto, partículas de difícil dissolução são lavadas para fora da matriz. A inclinação  $V_m$  irá depender da participação destes mecanismos na reação de remoção total.



**FIGURA 6** - Influência dos mecanismos de remoção sobre o comportamento

das curvas características  $v_a \times J$  [3,4]

#### 4.4.2 Comportamentos de remoção do tipo B e C

Os comportamentos mostrados nos gráficos B e C da Figura 5 são variantes do comportamento do tipo A, onde as retas apresentam um fator de proporcionalidade constante na parte inferior, portanto com os mecanismos descritos em 4.3.1 [3,4].

Uma variação da inclinação da reta para densidades de correntes maiores indica uma mudança no mecanismo de remoção que pode ter diversas origens:

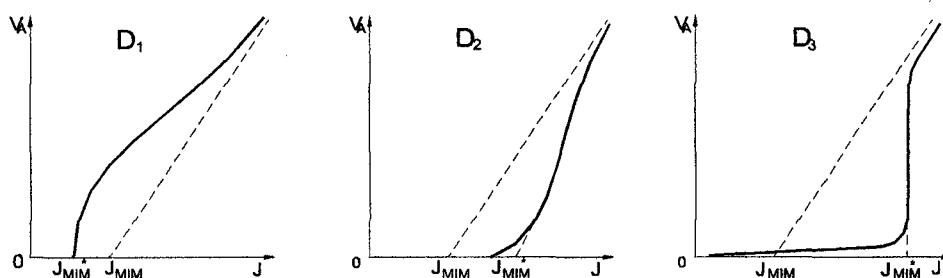
- A valência de um ou mais elementos que constituem a liga se altera. Uma diminuição (aumento) da valência ocasiona um aumento (diminuição) da inclinação da curva característica.
- Iniciam ou cessam uma ou mais reações que não participam da remoção. O fim (início) de uma reação secundária leva a um aumento (diminuição) da inclinação da curva característica.

#### 4.4.3 Comportamento de remoção dos tipos D, E e F

Os comportamentos de remoção mostrados nos gráficos D, E e F da Figura 5 são caracterizados por um comportamento de passivação. Como mostrado nas curvas de polarização, abaixo de  $J_{lim}$  temos apenas reações secundárias que não promovem remoção de material. Os motivos para o deslocamento da curva  $v_a \times J$  são os mesmos para vencer a passivação já descritos nas curvas de polarização. Após o rompimento do revestimento passivador valem os mesmos mecanismos de remoção descritos para os comportamentos A, B e C [3,4].

Enquanto as mudanças de um para outro mecanismo de remoção, em geral, são bruscas, e assim mostram uma mudança espontânea de um mecanismo de

remoção para outro, as curvas descritas pelos tipos D, E e F podem apresentar um comportamento variável na faixa de densidade de corrente mínima que não se consegue mais descrever por segmentos de retas. Assim classificam-se alguns tipos de transição que são específicos para certos tipos de materiais e condições de usinagem. A Figura 7 apresenta estes comportamentos transitórios de forma qualitativa.



**FIGURA 7** - Comportamento de transição das curvas características  $v_a \times J$  na faixa inferior de corrente [3,4]

Como o início da dissolução metálica na faixa da densidade de corrente mínima está relacionado com a ruptura da camada passivadora, as diferenças nos comportamentos transitórios das dependências entre  $v_a \times J$  (Figura 7) são decorrentes dos diferentes comportamentos das camadas passivadoras. Assim, o comportamento transitório do tipo D1 (Figura 7), apresenta uma ruptura súbita da camada passivadora ao atingir-se a densidade de corrente  $J_{min}^*$ , devido à dissolução metálica aumentar muito rapidamente acima desta densidade de corrente. O aumento muito rápido da



curva característica logo após o início da dissolução metálica, indica que o aumento da velocidade de remoção não pode ser resultante somente do aumento da densidade de corrente, mas também de uma parte da densidade de corrente que era consumida em reações secundárias que não participavam da dissolução abaixo de  $J_{\min}^*$ . Com o aumento da densidade de corrente após  $J_{\min}^*$ , novamente aumenta a parte da densidade de corrente que é consumida em reações que não participam da dissolução, até ocorrer a estabilização na faixa linear da curva característica em  $J_{\min}$ , que é o valor da densidade de corrente da interseção do prolongamento do comportamento linear da curva característica com o eixo de  $J$ .

Em D2 e D3 a ruptura da camada passivadora ocorre em valores superiores a  $J_{\min}$ . Também aqui a inclinação íngreme da curva característica mostra que um aumento da velocidade de remoção não pode resultar apenas do aumento total da densidade de corrente, mas também, de uma parcela da densidade de corrente que abaixo de  $J_{\min}$  era gasta em reações secundárias. Com o aumento da densidade de corrente, esta parcela vai diminuindo até a estabilização em  $J_{\min}$  na faixa de comportamento linear da curva característica.

Através desta classificação de comportamentos de remoção, foi possível classificar os materiais de acordo com seu comportamento de remoção. Mas, devido aos materiais de mesma composição química se comportarem diferentemente em diferentes soluções eletrolíticas, esta classificação deverá ter como critério superior o tipo de solução eletrolítica e a composição química do material.

Nos quadros 4 e 5, são apresentadas a classificação de alguns materiais segundo o seu comportamento em soluções de NaCl e NaNO<sub>3</sub> [3,4].

Trabalho de Remoção Eletroquímica	Grupo de Materiais	Critérios de classificação
Tipo A	C110 56 NiCrMo V 7 54 NiCrMo V 6 X 33 CrMo V 33 X 12 CrMo V 12 2 X 22 CrMo V 12	Aços homogêneos ou de fases múltiplas, cujas fases de má solubilização estão distribuídas de tal forma que elas podem ser retiradas da matriz por remoção do material circunvizinho. Teor de elementos de liga; Cr até 12% Ni até 2,5 % Mo até 2 %
Tipo B	X 10 CrNiTi 18 9 X 10 CrNiMoTi 18 10 NiCr 20 TiAl NiCr 20 Co 18 Ti NiCr 20 Co 14 MoTiAl NiCo 20 Cr 15 MoAlTi NiCr 20 Co 20 MoTiAl	Aços austeníticos e ligas de níquel, eventualmente com carbonetos nos contornos de grão
Tipo C	C 15 C 35 C 45 C 60	Aços com cementita lamelar que retardam ou evitam a lavação de fase de dissolução difícil.

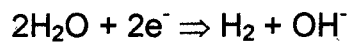
QUADRO 4 - Comportamento de remoção em solução de NaCl [3,4]

Trabalho de Remoção Eletrolítica	Grupos de Materiais	Critérios de Classificação
Tipo D	C 15 Ck 35 Ck45 Ck60 C 110 56 NiCrMo V 7 54 NiCrMo V 6 X 33 CrMo V 33 X 20 Cr 13 X 40 Cr 13 X 12 CrNiMo 12 2 X 22 CrMo V 12	Aços com estrutura ferrítica,perlítica ou martensítica. Teor de elementos de liga; Ni até 2,5 % Cr até 12 % Mo até 2 %  Aços com cementita lamelar
Tipo A ou D	X 10 CrNiTi 18 9 X 10 CrNiMoTi 18 10	
Tipo A	NiCr 20 TiAl NiCr 20 Co 18 Ti NiCr 20 Co 14 MoTiAl NiCo 20 Cr 15 MoAlTi NiCr 20 Co 20 MoTioAl	Ligas de níquel eventualmente com carbonetos nos contornos de grão

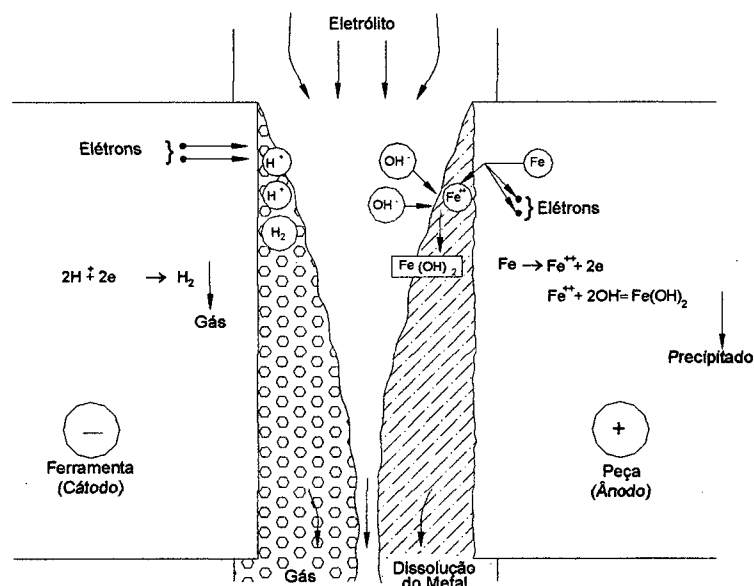
QUADRO 5 - Comportamento de remoção em solução de NaNO<sub>3</sub> [3,4]

## 4.5 REAÇÕES CATÓDICAS

Quando na usinagem eletroquímica ocorrem reações catódicas [5,6,7,8,10,13,14] (Figura 8), geralmente estas consistem na formação de hidrogênio



ou na redução dos ânions eletrolíticos, ou ambos.



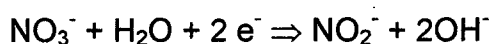
**FIGURA 8** - Reações catódicas e anódicas, na usinagem eletroquímica [14]

O hidrogênio formado na usinagem eletroquímica leva à liberação de bolhas de gás na superfície catódica. O fluxo de eletrólito as mantém pressionadas contra o cátodo e uma camada gás-liquído é formada na superfície. Se o eletrólito possui um longo trajeto no "gap", como no caso da usinagem eletroquímica de peças de grande tamanho, as bolhas de hidrogênio se agrupam todas no "gap" a uma mesma distância

da entrada de eletrólito. A camada gás-líquido produzida na superfície catódica promove um aumento na resistência elétrica, podendo prejudicar o rendimento do processo de usinagem.

A remoção do gás é facilitada pelas altas velocidades de escoamento da solução eletrolítica. Com isto a camada gás-líquido no cátodo, e em consequência a resistência elétrica entre a solução eletrolítica e o cátodo, é então reduzida. O conteúdo de gás na solução eletrolítica é o maior fator responsável pelas variações da taxa de remoção ao longo do “gap” (na direção do fluxo de eletrólito), ocasionando uma diminuição na precisão da usinagem eletroquímica.

Em eletrólitos à base de nitrato, a formação de hidrogênio é de todo inexistente ou acompanhada da redução do ânion  $\text{NO}_3^-$ . A primeira fase desta reação pode ser escrita como:



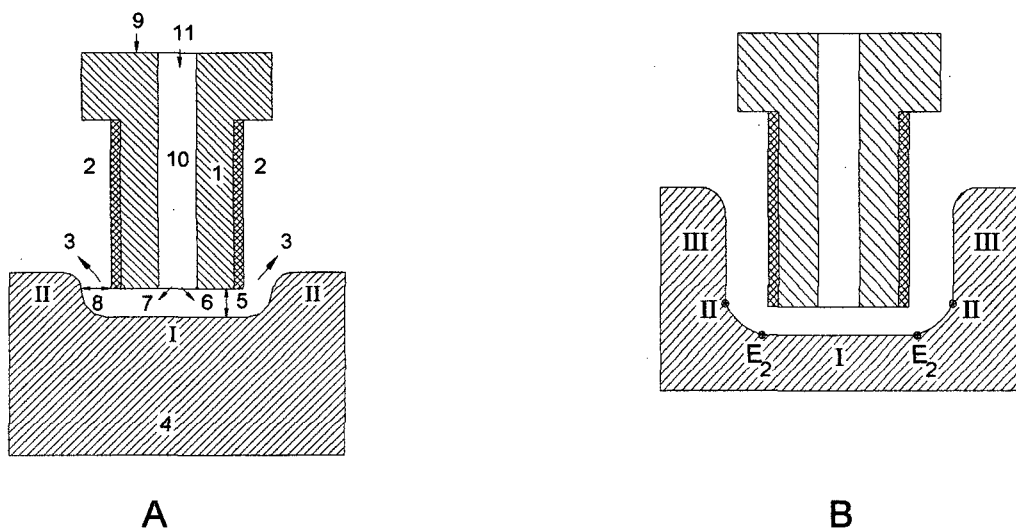
Sob condições favoráveis, esta reação pode através de várias etapas chegar a formar amônia.

A usinagem eletroquímica em eletrólitos de nitrato é acompanhada pela formação de menor quantidade de gás que em eletrólitos à base de NaCl. Consequentemente, temos uma menor quantidade de gás no “gap”. A adição de cloreto de sódio à uma solução eletrolítica suficientemente concentrada de nitrato não causa um aumento na taxa de formação de gás[7,10].

#### 4.6 CONFINAMENTO DA DISSOLUÇÃO ANÓDICA EM ECM

O termo confinamento refere-se à necessidade de que a dissolução anódica ocorra somente entre as áreas anódicas separadas do cátodo por uma fenda muito

pequena, “gap”. Como o eletrodo-ferramenta (cátodo) se move na direção da remoção de metal e o “gap” é mantido no valor especificado, o formato da ferramenta pode ser reproduzido negativamente na peça de trabalho (ânodo), a cavidade na peça terá forma e tamanho semelhante aos da ferramenta. O modo pelo qual a usinagem eletroquímica é utilizada para executar furos cilíndricos numa peça com o auxílio de uma ferramenta tubular é mostrado na Figura 9 [5,7,10].



**FIGURA 9** - Furação eletroquímica , A início da usinagem, B final da usinagem [8]

1 - cátodo, eletrodo ferramenta tubular; 2 - revestimento da superfície lateral do eletrodo-ferramenta; 3 - saída de solução eletrolítica; 4 - ânodo, peça de trabalho; 5 - “gap” frontal; 6 - face de usinagem do eletrodo-ferramenta tubular; 7 - entrada de solução eletrolítica no “gap”; 8 - “gap” lateral; 9 - direção de avanço da ferramenta; 10 - passagem da solução eletrolítica pelo eletrodo-ferramenta; 11 - direção do fluxo de solução eletrolítica; I - área de trabalho a ser usinada eletroquimicamente; II , III - superfícies laterais que não devem ser usinadas eletroquimicamente.

Para furos de forma cilíndrica serem executados é essencial que ocorra a dissolução do material do ânodo somente na parte frontal da ferramenta (área I) onde o “gap” entre eletrodos é mínimo e que não ocorra dissolução nos lados (áreas II e III). A precisão da reprodução negativa de forma aumenta na proporção que diminui a dissolução do metal nas áreas II e III.

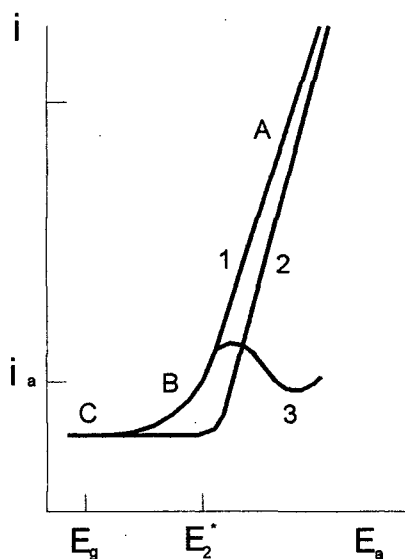
A tensão  $V$  aplicada nos eletrodos deve ser tal que o potencial anódico na área usinada seja maior que  $E^*$  (vide Figuras 4 e 10). O potencial nas áreas laterais II e III deve ser inferior ao da área I.

O confinamento da dissolução anódica na área a ser usinada e a precisão de forma depende do potencial anódico nas áreas II e III, das respectivas correntes e dos eventos eletroquímicos associados [10].

Nas soluções eletrolíticas à base de  $\text{NaNO}_3$  a pequena queda no potencial na mudança da região I para a região II ocorre não somente pela queda abrupta na corrente (pequena inclinação da curva de polarização 1 na região I na Figura 10), mas, mais importante, por uma repentina queda na eficiência de corrente para a dissolução do metal [10,13].

Esta é a razão porque não se dissolve o metal na área II da peça (Figura 9) enquanto (em comparação com a área I) somente uma pequena corrente está fluindo devido à difusão da corrente no eletrólito, a qual ocorre sempre que as superfícies laterais do cátodo são bem isoladas. O fluxo de corrente na área II causa somente a evolução do oxigênio (potencial da região II na curva de polarização 1 na Figura 10.2). Na área III (Figura 9) enquanto o “gap” frontal (o “gap” entre o cátodo e a peça em frente deste), é suficientemente grande e, em consequência, o potencial anódico é suficientemente pequeno (e corresponde a região III na curva de polarização na Figura 10), não ocorre dissolução devido a corrente ínfima que flui neste local. A

dissolução anódica do ferro e outros metais em soluções eletrolíticas de  $\text{NaNO}_3$  é confinada dentro de uma área específica, I, da peça. Este fato provê uma precisão alta na reprodução negativa da forma da ferramenta na peça, devido a distribuição de potencial anódico ( na peça ) é que  $E_2^*$  é obtido precisamente nos contornos entre as áreas da peça que devem ser e que não devem ser usinadas, como mostrado na Figura 9, B [10].



**FIGURA 10** - Curvas de polarização, (1) total; (2) parcial para dissolução anódica do metal e (3) parcial para evolução do oxigênio no ânodo [10]

Num estudo sobre os efeitos de vários fatores no potencial anódico de ativação aniônica,  $E^*$ , e da dependência de  $\eta$  em  $E_a$ , verificou-se que uma ótima distribuição de potencial na superfície anódica pode ser conseguida através da escolha apropriada da tensão aplicada  $V$ , concentração do eletrólito, da temperatura e da taxa de fluxo do mesmo. Se, por exemplo, a tensão escolhida  $V$  é menor que o valor ótimo, a operação de usinagem eletroquímica irá paralisar devido à superfície da

peça entrar no estado passivo ( $E^*_2$  estará situado próximo ao ponto de entrada do eletrólito no “gap” entre eletrodos, conforme Figura 9). Se, em contraste, a escolha da tensão  $V$  for muito alta, a precisão da reprodução negativa de forma será prejudicada devido a  $E^*_2$  situar-se próximo ao ponto de saída da solução eletrolítica do “gap” entre os eletrodos (Figura 9, B), causando alguma dissolução de metal da superfície lateral [10].

Como mostrado anteriormente, existe uma diferença bem definida no comportamento anódico dos metais em eletrólitos de NaCl e de NaNO<sub>3</sub>. Esta diferença é vital na precisão da ECM. Em contraste com o que temos com eletrólitos de NaNO<sub>3</sub>, com NaCl ocorre o seguinte:

- 1 - O potencial de ativação  $E^*_1$  é somente pouco maior que  $E_{ss}$ , e a passividade do metal na faixa de potencial entre  $E_{ss}$  e  $E^*_1$  é pequena.
- 2 - A passividade salina não protege o metal da dissolução ( $i_{lim1}$  tem um alto valor).
- 3 - O potencial de ativação  $E^*_1$  é inferior ao potencial em que se inicia a evolução de oxigênio (vide Figura 4).
- 4 - A eficiência de corrente para a dissolução de metal é alta em toda a faixa de potencial de interesse em ECM (vide Figura 10).

O efeito agregado dos fatores acima é que a dissolução anódica tem lugar não somente na área I, mas também nas áreas II e III (vide Figura 9). Em consequência, o furo feito por uma ferramenta de ECM cilíndrica pode se tornar mais cônico que cilíndrico na forma. (área III exposta a ação de usinagem da corrente por mais tempo que a área I).

A precisão da ECM em um eletrólito de NaCl é baixa. De outro modo, a taxa de usinagem com eletrólito de NaCl para os mesmo metais, é em regra, maior que a



dos outros eletrólitos. Isto é devido às altas densidades de corrente e alta eficiência de corrente alcançadas neste eletrólito em baixos potenciais anódicos.

Então, o conhecimento do comportamento anódico dos metais e sua relação com os parâmetros principais da ECM, precisão, taxa de usinagem e acabamento superficial, oferece a oportunidade de escolher ambos, composição do eletrólito e as variáveis de processo, para se alcançar o objetivo específico [3,7,10].

A soma dos pontos acima fornecem três requisitos-chaves para assegurar alta precisão do processo de ECM e uma alta taxa de usinagem [10].

I - A ativação necessária da superfície anódica para ter lugar uma dissolução anódica com alta taxas de remoção de metal requer um potencial positivo, maior que o necessário para ocorrer a evolução anódica do oxigênio. Entre o estado de equilíbrio e o potencial de ativação anódica, o metal deve possuir um estado passivo onde a dissolução praticamente não ocorre.

II - Seguindo a ativação anódica do metal, a sobretensão de ativação da superfície para manter a ionização do metal ocorrendo, deve ser menor que a sobretensão da evolução de oxigênio, a qual deve ser maior comparada à sobretensão da superfície passiva. Isto ocasionará um aumento na eficiência do potencial de ativação

As duas observações acima podem ser satisfeitas pela escolha apropriada do eletrólito. Para ambas, o melhor é o  $\text{NaNO}_3$ . A observação I não é satisfeita pelo  $\text{NaCl}$ .

Mais uma observação pode ser adicionada às duas primeiras. Ela é relacionada não só com a composição dos eletrólitos, mas também com as variáveis de processo.

III - As variáveis do processo de ECM devem ser selecionadas de modo a prover uma distribuição do potencial na superfície da peça, de modo que a carga de potencial nos

contornos entre áreas que devem ser ou não usinadas eletroquimicamente seja igual ao potencial de ativação anódica aniônica. Para taxas de remoção de material suficientemente altas, a densidade de corrente  $J$  no potencial de ativação do ânodo  $E^*$  deve ser igualmente alta.

Com relação à última observação, devemos optar pelo método pelo qual possamos efetivamente confinar a dissolução anódica entre as áreas a serem usinadas a altas densidades de corrente. Com este método, uma escolha de corrente pulsante ao invés de contínua em usinagem eletroquímica, conseguem-se bons resultados em relação à precisão de forma. As fontes de corrente pulsada ao invés de contínua têm demonstrado bons resultados na maioria dos metais, devido à redução na passivação da interface e a diminuição do gradiente de temperatura que se estabelece entre a entrada e a saída da solução eletrolítica, reduzindo a formação de bolhas no “gap”.

O grau de confinamento anódico pode ser qualitativamente avaliado em termos do fator de confinamento definido como:

$$K = \frac{m_1}{m_2} \frac{h_1}{h_2} \quad (16)$$

onde

$K$  - fator de confinamento;

$m_1$  - remoção de metal durante um tempo especificado no tamanho de “gap”  $h_1$ ;

$m_2$  - remoção de metal durante um tempo especificado no tamanho de “gap”  $h_2$ .

O fator de confinamento é igual à unidade para o processo de usinagem eletroquímica ideal. Um fator de confinamento,  $K$ , maior que a unidade significa que o confinamento da dissolução anódica é melhor do que o confinamento do processo de usinagem eletroquímica ideal, e com um fator de confinamento,  $K$ , menor que a unidade o confinamento será pior. No caso em que o fator de confinamento,  $K$ , for

menor que 0,5 não se consegue alcançar dimensões específicas no processo de usinagem eletroquímica.

## 4.7 PARÂMETROS DE PROCESSO

Na usinagem eletroquímica tem-se vários parâmetros envolvidos, que respondem pelos resultados alcançados pelo processo (Figura 12) [12,16]. Estes parâmetros podem ser classificados como passíveis de controle ou monitoramento, e os parâmetros controlados pela sinergia do processo (Figura 11) [3,4,5,6,7,8,10,13,14,16].

Entre os parâmetros passíveis de controle pode-se citar [6]:

- Tensão da fonte / intensidade de corrente máxima;
- Velocidade de avanço da ferramenta;
- Parâmetros relacionados à solução eletrolítica.

A seguir será mostrado como cada um destes parâmetros influem nos resultados e nas condições de usinagem eletroquímica;

### 4.7.1 Tensão da fonte

A tensão, ou diferença de potencial entre os eletrodos, influi nos resultados da usinagem eletroquímica, de acordo com as curvas de polarização descritas no capítulo 4, item 4.3. A escolha da tensão de trabalho deve ser realizada de maneira a se situar na região adequada da curva de polarização do par material - solução eletrolítica com o qual se está trabalhando. Os valores usualmente utilizados variam de 5 a 15 volts, chegando em casos especiais a 40 volts. A escolha da tensão afeta,

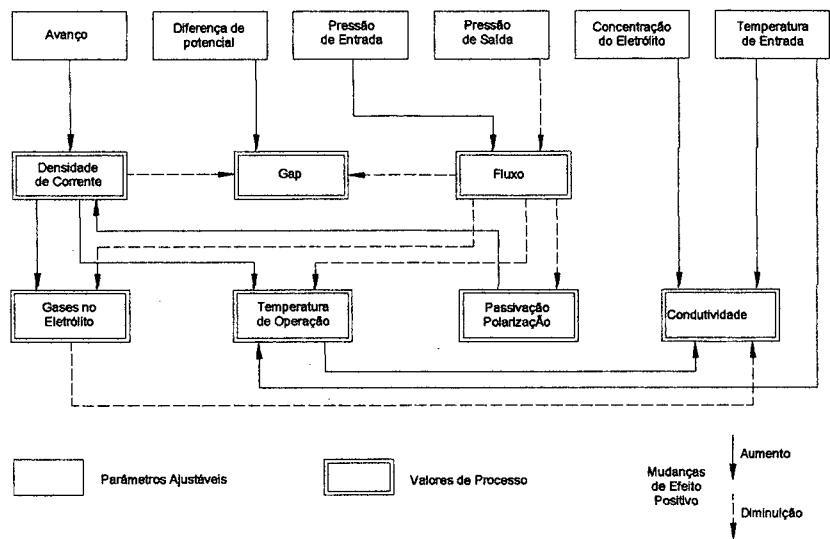


FIGURA 11 - Classificação dos parâmetros do processo de usinagem eletroquímica

[16]

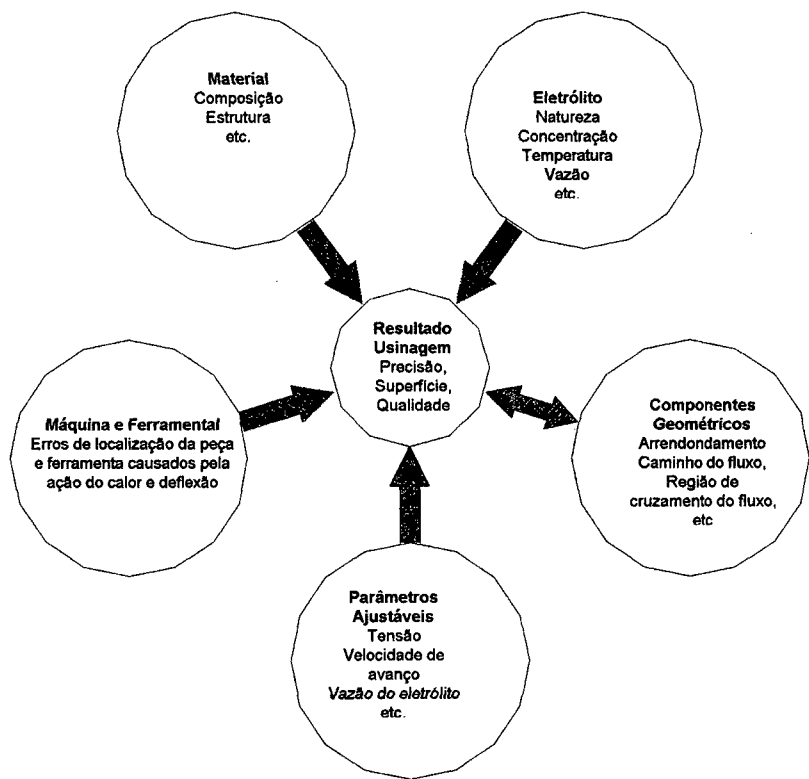


FIGURA 12 - Fatores que influenciam o processo de usinagem eletroquímica ECM

[16]

a corrente e determina a densidade de corrente durante a usinagem eletroquímica, como mostrado na Figura 11 e nas curvas de polarização [3,7,8,10,14].

#### 4.7.2 Velocidade de Avanço

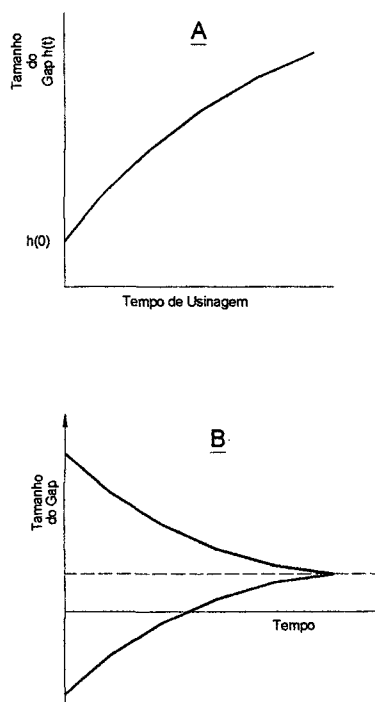
Durante o processo de usinagem a distância entre a ferramenta e a peça, o “gap”, tende a crescer devido à remoção de material da peça. Como visto na equação 9, a densidade de corrente depende do valor do “gap”, e qualquer alteração deste influenciará o valor da densidade de corrente e a tensão, modificando assim o comportamento da dissolução anódica do metal. O ideal para o bom funcionamento do processo é um tamanho de “gap” e uma densidade de corrente constante, conseguido com a estabilização do processo onde a velocidade de remoção de material,  $v_a$ , é igual à velocidade de avanço da ferramenta,  $v_f$ , em direção à peça [6].

Na prática existem três casos [3,7,13]:

a -  $v_f = 0$ , ferramenta estática; o “gap” aumenta indefinidamente com o tempo (Figura 13). Esta condição é utilizada em rebarbamento eletroquímico onde as irregularidades superficiais são removidas em poucos segundos, sem necessidade de movimentação do eletrodo [3,5,6,7,8].

b -  $v_f = \text{constante}$ ; a ferramenta movimenta-se a uma velocidade constante em direção à peça. O tamanho do “gap” tende a um valor de equilíbrio,  $h_e$ , dado por

$$h_e = \left( \frac{Nk_e V}{zF\rho_a f} \right) \quad (17)$$



**FIGURA 13** - Variação do tamanho do “gap” com o tempo de usinagem [13]

A: ferramenta estática

B: velocidade de avanço constante

Esta característica própria da usinagem eletroquímica, pela qual um tamanho de “gap” de equilíbrio é obtido, é utilizada para reprodução de forma da ferramenta na peça, sendo a condição otimizada de trabalho,  $v_f = v_a$  [6,7,13].

c - Condição de curto-circuito; se as condições do processo resultam em velocidade de avanço muito alta, o “gap” de equilíbrio pode ser muito pequeno e resultar em contato entre os eletrodos ferramenta-peça, ocasionando um curto-circuito entre os eletrodos e encerrar prematuramente o processo de usinagem com danos tanto à peça como à ferramenta [7,13].

### 4.7.3 Solução eletrolítica

A solução eletrolítica tem como principal função completar o circuito entre os eletrodos ferramenta-peça, permitindo que ocorram as reações eletródicas desejadas ao processo de dissolução anódica. Além desta, a solução eletrolítica tem também a função de retirar o calor e os produtos da reação para fora da zona intereletrodica, "gap". Assim, para uma solução eletrolítica ser considerada eficiente e adequada ao uso em usinagem eletroquímica, deve satisfazer determinadas exigências [3,5,6,8,13,14]:

- Alta estabilidade química;
- Boa condutividade elétrica;
- Pouca ação corrosiva;
- Neutralidade fisiológica em relação aos operadores;
- Baixo custo.

As soluções eletrolíticas podem ser classificadas de diversas maneiras, como por exemplo pelo pH, tipo de sal, se produz ou não borra, etc.[5,6,10]. Frequentemente é utilizada a classificação pelo pH, dividindo-se assim em soluções eletrolíticas neutras, alcalinas e ácidas. O quadro 6 mostra uma relação de diversas soluções eletrolíticas, suas características básicas e sua utilização mais frequente.[3,8,14]

As soluções eletrolíticas mais utilizadas em usinagem eletroquímica, são o cloreto de sódio e o nitrato de sódio. E em casos especiais é utilizado o ácido sulfúrico.

SOLUÇÃO	CONCENTRAÇÃO EM PESO	APLICAÇÕES	COMENTÁRIOS
NaCl	5 - 20	aços ligados e não ligados	não passivante, cratera, barato, seguro, agressivo ao equipamento
NaNO <sub>3</sub>	10 - 20	aços ligados e não ligados, ligas de Al, Cu, Zn	passivante nos aços, universalmente aplicável, recomendável supervisão do pH
HCl, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	acima de 10	para aplicações especiais, ligas de Ni, Cr, Co	material removido é diluído, superfície brilhante, cáustico
NaClO <sub>3</sub>	20 - 45	aços	altas taxas de remoção, bom acabamento, perigoso por ser inflamável

QUADRO 6 - Tipos de soluções eletrolíticas [3,8]

A seguir apresentam-se as características de cada solução:

- cloreto de sódio - NaCl - é a solução eletrolítica mais utilizada em usinagem eletroquímica, apesar da pouca precisão conseguida com sua utilização, devido aos fatores já analisados nas curvas de polarização. As concentrações normalmente utilizadas estão em torno de 60 a 240 g/l. O filme anódico formado é fino, com camada não protetora de sais porosos como, por exemplo, formada por Fe(OH)<sub>2</sub> [3,7,8,10,14].
- nitrato de sódio - NaNO<sub>3</sub> - é a segunda solução mais utilizada em usinagem eletroquímica. Com esta solução consegue-se uma melhor precisão, mas a uma taxa de remoção de material menor que a solução à base de cloreto de sódio. As concentrações normalmente utilizadas variam de 120 a 480 g/l. O filme anódico formado é de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, bom condutor elétrico e favorece outras reações químicas além da dissolução anódica [3,7,10].
- ácido sulfúrico - H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - é utilizado em uma variante da furação eletroquímica denominada de STEM, Shaped Tube Electrolytic Machining, para a realização de



furos com grande relação profundidade/diâmetro (até 300/1). As concentrações utilizadas se situam entre 6 e 15% em volume [3,8].

## 4.8 PRECISÃO

A precisão da usinagem eletroquímica deve ser considerada sob vários aspectos [3,7,8,10]:

- Conformidade da peça acabada com os requisitos de projeto em termos de forma e dimensões;
- Transferência da forma da ferramenta para a peça;
- Repetibilidade dimensional dentro de um lote de peças usinadas pelo mesmo eletrodo-ferramenta.

A precisão do processo de usinagem eletroquímica é afetada por diversos parâmetros do processo. Como realçado na Figura 12, para se obter uma boa precisão em usinagem eletroquímica, é imprescindível um bom conhecimento da interdependência das variáveis do processo, visto que devido à complexidade desta, previsões da ação dos parâmetros isolados sobre o resultado do trabalho não são possíveis. Para se determinar as condições ótimas de trabalho e as correções necessárias à ferramenta, necessita-se de ensaios e pré-testes muito trabalhosos e dispendiosos.

Para contornar este problema, pesquisas têm sido feitas visando o desenvolvimento de modos de determinação das condições de trabalho menos onerosos, utilizando-se de modelos matemáticos [14,15], modelos baseados em simulação por elementos finitos [16], e em bancos de dados [17]. Conseguiu-se com a

ajuda destes uma diminuição do número de pré-testes necessários para determinação das condições ótimas de trabalho.

#### 4.9 INTEGRIDADE SUPERFICIAL

A integridade superficial descreve as muitas alterações possíveis produzidas na camada superficial durante a usinagem, incluindo os efeitos nas propriedades do material e no desempenho da superfície durante a utilização. O quadro 7 fornece as principais alterações superficiais que podem ocorrer nos processos de fabricação com remoção de cavaco, remoção por descarga elétricas e remoção eletroquímica [3,7,10,11,14].

Embora na usinagem eletroquímica não se introduza tensões residuais o comportamento de fadiga do componente pode ser afetado no processo. O quadro 8 mostra alguns exemplos onde a tensão para vida infinita ( $10^7$  ciclos) é menor que os valores referenciados na literatura. Este fato pode ser devido à ausência de tensões compressivas durante a usinagem, a rugosidade, o ataque intergranular e o ataque seletivo [3,7,8,10,11,14].

A rugosidade é afetada pelos parâmetros de processo, como pela temperatura da solução eletrolítica, pela densidade de corrente e pelo modo de alimentação da solução eletrolítica. O estado metalúrgico do material também afeta a rugosidade obtida pelo processo.

O ataque intergranular (IGA, Intergranular Attack) é a forma de corrosão ou ataque químico onde as reações são concentradas nos contornos de grão. A ocorrência do ataque intergranular depende dos parâmetros do processo e do material utilizado na peça a ser usinada [14].

MATERIAL	MÉTODOS CONVENCIONAIS		MÉTODOS NÃO CONVENCIONAIS	
	FRESAGEM, FURAÇÃO RETIFICAÇÃO		EDM	ECM
aços	R, PD,L&T	R, PD	R, MCK, RC	R, SE, IGA
aços ferramenta	R, PD,MCK, L&T,UTM,OTM	R, PD, MCK, UTM, OTM	R, MCK, RC, UTM, OTM	R, SE, IGA
aço inoxidável martensítico	R,PD,L&T, MCK, UTM, OTM	R, PD, MCK, UTM,OTM	R, MCK, RC, UTM, OTM	R, SE, IGA
aço inoxidável austenítico	R, PD, L&T	R, PD	R, MCK, RC	R, SE, IGA
ligas refratárias	R, L&T, MCK	R, MCK	R, MCK	R, SE, IGA

R - rugosidade, PD - deformação plástica, L&T - dobras, MCK - micro trincas, SE - ataque seletivo, IGA - ataque intergranular, UTM - martensita subvenida, OTM - martensita superevenida

**QUADRO 7 -** Possíveis alterações superficiais resultantes de processos de usinagem [14]

material	valor obtido	valor de referência em'handbook'
321, aço inoxidável	207	255,3
403, aço inoxidável	372,6	469,2
300M, 52 Rc	676,2	841,8
Ti-6Al-4V, 36Rc	262,2 a 414,0	462,3
Liga Inconel 718, 44 Rc	214,5 a 289,8	414,0

Tensão de fadiga a 10<sup>7</sup> ciclos, MPa

**QUADRO 8 -** Tensões de fadiga de alto ciclo para usinagem eletroquímica [14]

O ataque seletivo, SE (Selective Etching), é a forma de corrosão em processo ou ataque químico onde as reações são concentradas dentro dos grãos ou concentradas em certos constituintes do material base, como em ligas. A ocorrência do ataque seletivo pode ser controlada, como também o ataque intergranular, pela correta seleção dos parâmetros de processo para o material desejado de se usar. No quadro 9 são apresentados os valores típicos de parâmetros de processo para a usinagem eletroquímica [14].

<b>Fonte de Alimentação</b>	
tipo	corrente constante
tensão	5 a 30 V
corrente	50 a 40000 A
densidade de corrente	8 a 465 A/cm <sup>2</sup>
<b>Solução Eletrolítica</b>	
tipo e concentração:	
mais utilizada	NaCl, 60 a 240 g/L
frequentemente utilizada	NaNO <sub>3</sub> , 120 a 480 g/L
difícilmente utilizada	soluções especiais
temperatura	26 a 46 °C
vazão	0.95 L/min/100 <sup>A</sup>
velocidade	1500 a 3000 m/min
pressão de entrada	137 a 2060 kPa
pressão de saída	0 a 310 kPa
"Gap" de trabalho frontal	0.076 a 0.76 mm
Sobrecorte lateral	0.127 a 1 mm
Velocidade de avanço	0.03 a 13 mm/min
Material da ferramenta	ver quadro 10
<b>Tolerância</b>	
formas bidimensionais	± 0.025 mm
formas tridimensionais	± 0.050 mm
Rugosidade, Ra, frontal	0.2 a 1.6 µm

**QUADRO 9** -Valores típicos de parâmetros de usinagem eletroquímica [14]

## 4.10 SEGURANÇA E AMBIENTE

### 4.10.1 Segurança

No caso da segurança do operador e das instalações, além das precauções normais, como instalações elétricas dentro das normas de segurança, construção sólida, etc. As instalações devem ser providas de um sistema de ventilação e de exaustão com analisadores de quantidade de gás, devido à geração de gases pelo processo de usinagem eletroquímica, como por exemplo de gases nitrosos e o hidrogênio, prejudiciais à saúde e que apresentam risco de explosão.

O operador do deve trabalhar trajando equipamentos de proteção individual adequados ao manejo de produtos químicos e voláteis como óculos de proteção, luvas e vestimenta resistente a ataques químicos, sapatos de proteção , etc., para minimizar ou evitar os prejuízos e riscos à sua saúde [3,5,10].

O quadro 10 apresenta um resumo dos riscos à saúde do operador e às instalações das soluções mais utilizados [14].

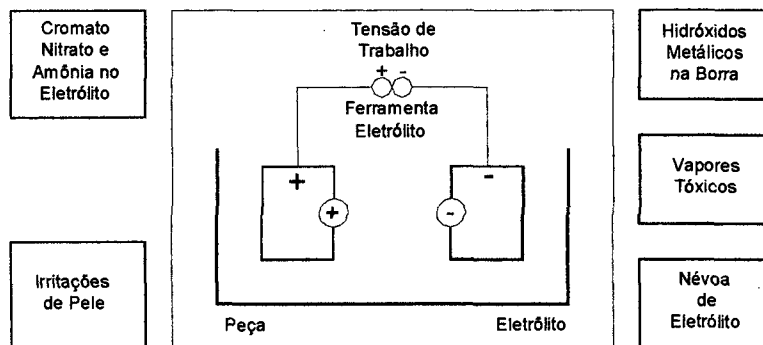
SOLUÇÃO ELETROLÍTICA	SEGURANÇA	CORROSIVIDADE
<b>Cloreto de Sódio NaCl</b>	seguro	altamente corrosivo
<b>Nitrato de Sódio NaNO<sub>3</sub></b>	seguro em solução, risco moderado de explosão quando seco ou misturado com materiais orgânicos	pouco corrosivo
<b>Clorato de Sódio NaClO<sub>3</sub></b>	seguro em solução, altamente combustível quando seco. Precauções especiais requeridas	pouco corrosivo
<b>Hidróxido de Sódio NaOH</b>	requer cuidado, pode causar sérias queimaduras	corrosividade média com ligas ferrosas e muito corrosivo com alumínio, zinco e cádmio
<b>Ácido Sulfúrico</b>	perigoso, pode causar sérias queimaduras	altamente corrosivo
<b>Outros ácidos, HCl, HNO<sub>3</sub>, etc</b>	perigosos, podem causar sérias queimaduras	altamente corrosivo

**QUADRO 10 -** Resumo dos efeitos à saúde e à segurança das instalações das principais soluções eletrolíticas [8,14]

#### 4.10.2 Impacto Ambiental

Os dejetos produzidos na usinagem eletroquímica podem conter produtos nocivos à saúde e por conseguinte não podem ser despejados no ambiente. Assim, na utilização do processo de usinagem eletroquímica deve-se tomar precauções para

a minimização do impacto ambiental causado pelos produtos de remoção eletroquímica [9,14].



**FIGURA 14** - Impactos da usinagem eletroquímica no meio ambiente e saúde do operador [9]

Deve-se tomar precauções especiais no descarte da borra resultante da dissolução anódica. O efeito negativo da borra pode ser minimizado ou até eliminado quando a utilizamos como aditivo para o concreto ( a característica básica do concreto evita a passagem dos metais pesados ao ambiente e neutraliza a borra) ou no reprocessamento e extração dos metais envolvidos como o níquel, cobalto, tungstênio, molibdênio, etc. [6,10].

## **CAPÍTULO 5**

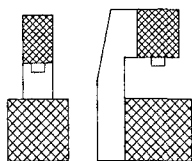
### **EQUIPAMENTO DE USINAGEM ELETROQUÍMICA**

O equipamento para usinagem eletroquímica deve apresentar algumas características básicas, apresentadas na seqüência, para propiciar um bom desempenho do processo de usinagem.

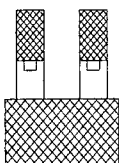
#### **5.1 ESTRUTURA**

A estrutura do equipamento de usinagem eletroquímica deve apresentar uma elevada rigidez estática, para que deformações, devido às elevadas pressões utilizadas no fluxo da solução eletrolítica, 5 a 50 bar [3,10,14], não prejudiquem a precisão das peças produzidas. Deve, ainda, prever pontos de resfriamento para que não ocorram deformações devido a dilatações térmicas causadas pela conversão de parte da energia elétrica em térmica. Em função destas razões a estrutura dos equipamentos de usinagem eletroquímica é, normalmente, em forma de 'C' ou 'O', como mostrado nas representações esquemáticas da figura 15. A figura 16 mostra um equipamento de usinagem eletroquímica industrial [15].

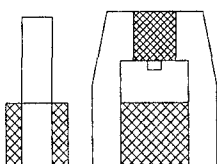
O equipamento de usinagem eletroquímica, devido às características inerentes ao processo, deve apresentar uma boa estabilidade contra o ataque corrosivo por parte das soluções eletrolíticas.



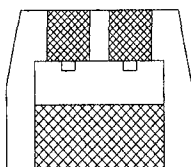
Forma construtiva em 'C' apresentando apenas um cabeçote para usinagem.



Forma construtiva em duplo 'C' apresentando dois cabeçotes para usinagem



Forma construtiva em 'O' ou portal com apenas um cabeçote para usinagem

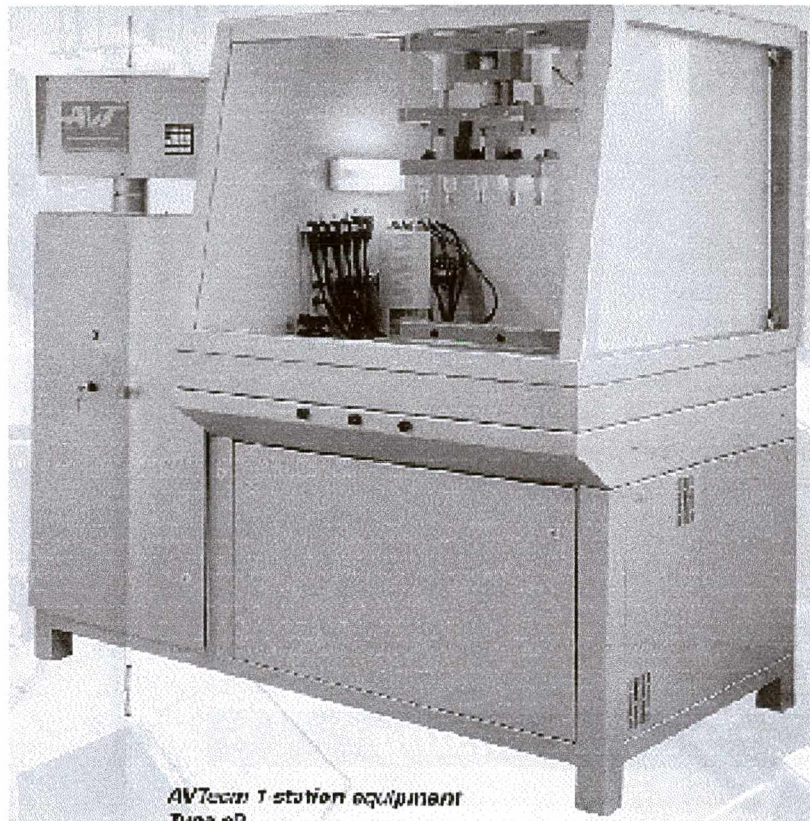


Forma construtiva em 'O' apresentando dois cabeçotes para usinagem

**FIGURA 15** - Esquemas construtivos da estrutura de equipamentos de usinagem eletroquímica [10,12]

Para a prevenção deste fato, a construção de um equipamento de usinagem eletroquímica deve ser realizada com materiais resistentes à corrosão, como o aço inoxidável, ou revestidos com material resistente à corrosão como os plásticos e as resinas [6,10,13].





**FIGURA 16** - Equipamento de ECM, AVTecom [15].

## 5.2 FONTE DE ALIMENTAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A usinagem eletroquímica requer baixas tensões, normalmente, entre 5 e 15 V, mas pode-se chegar a 40 V em casos especiais. As correntes utilizadas em equipamentos industriais de grande porte situam-se na faixa de 100 a 40 000 A, com densidades de corrente até faixa a de  $500 \text{ A/cm}^2$  [3,5,8,11,14].

Uma fonte de equipamento de usinagem eletroquímica deve, converter a energia elétrica alternada disponível (geralmente 240 a 480 V de 50 a 60 Hz) em energia elétrica contínua de baixas tensões (de 5 a 40 V), dispor controles precisos de ajuste do valor da tensão, meios de detecção de curtos-circuitos, bem como um

sistema de rápido desligamento (em caso de detectar curtos-circuitos) [5,6,10]. As modernas fontes de alimentação são transistorizadas ou tiristorizadas para o controle preciso da tensão [5,10].

### 5.3 ELETRODOS-FERRAMENTA E DISPOSITIVOS

O eletrodo-ferramenta é confeccionado de forma a reproduzir a sua imagem na peça. De forma geral todos os materiais condutores de eletricidade podem ser empregados na fabricação de eletrodos-ferramenta. A escolha do material do eletrodo-ferramenta deve observar os seguintes fatores [3,5,8,10]:

- Ter condutividade elétrica elevada;
- Ser de boa usinabilidade;
- Ter alta estabilidade química;
- Ter resistência mecânica média,

Desta maneira, escolhe-se o material mais apropriado para a aplicação desejada utilizando como base tabelas como a do quadro 11.

O projeto da forma final que o eletrodo-ferramenta deve possuir para que se obtenha a peça com a forma desejada e de complexa execução pois deve obedecer a fatores de correção inerentes às características do processo. Estes fatores são de difícil obtenção para geometrias complexas onde um grande número de variáveis está envolvido. Nestes casos os fatores de correção são obtidos iterativamente através de testes e ensaios, o que muitas vezes torna o processo antieconômico. Vários trabalhos de pesquisa procuram minimizar o número de testes necessários para determinação do fator de correção através da utilização de métodos numéricos

e de análise computacional como os trabalhos de Hardisty [17], Khairy [18] entre outros.

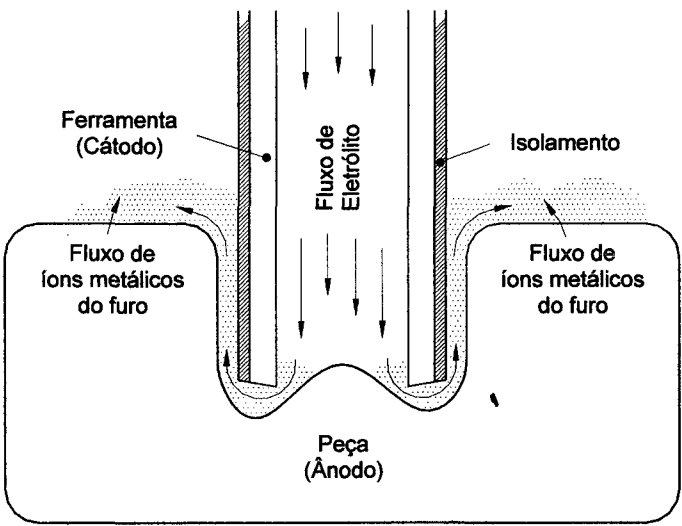
MATERIAL	RESISTIVIDADE ELÉTRICA microhm-cm A 20°C	CONDUTIVIDADE TÉRMICA cal/cm <sup>2</sup> cm/s/°c	PONTO DE FUSÃO °C	RESISTÊNCIA A CURTO-CIRCUITO	MANUTENÇÃO	COMENTÁRIO
bronze comercial	3.8	0.479	885	fraca	satisfatório	alto silício, bronze ou alumínio pode ser utilizado para aumentar resistência
aço inoxidável austenítico	73.0	0.039	1385	boa	boa	fácil reparo,
aço carbono 1045	16.2	0.141	1482	fraca	boa	não recomendado, fácil corrosão
ligas de titânio	170	0.098	1800	satisfatório	satisfatório	boa resistência à corrosão

#### QUADRO 11 - Material para eletrodos ferramenta [14]

Em certos tipos de usinagem eletroquímica, como a furação, os eletrodos devem ser recobertos por um isolante para uma maior precisão e acabamento da peça (figura 17). Estes materiais são mostrados no quadro 12, e devem possuir as seguintes características [3,5,6,10,13,14]

- Boa adesão à ferramenta;
- Ausência de poros, para não ocorrer fuga de corrente elétrica;
- Pequena espessura, para não influir demasiadamente na dimensão final do furo;
- Boa resistência ao calor, para resistir às deformações térmicas;
- Alta estabilidade química, para resistir ao contato com as soluções eletrolíticas;

- Ser de fácil aplicação.



**FIGURA 17 - Eletrodo-ferramenta revestido para furação eletroquímica [5]**

O dispositivo, além das funções normais, como fixação e posicionamento da peça e da ferramenta, deve, também, cumprir funções específicas do processo de usinagem eletroquímica. Estas funções são estabelecer o contato elétrico dos eletrodos, condução e a retirada da solução eletrolítica da região intereletrolítica [6].

REVESTIMENTO	RESISTÊNCIA QUÍMICA	RESISTÊNCIA A ABRASÃO	COMENTÁRIOS
vidro	boa	boa	pouca resistência a choques mecânicos
nylon	limitada, fraca à bases e ácidos	excelente	isolamento elétrico excelente, baixa absorção de água
PVC	boa	boa	--
resinas epóxi s/solvente	boa	boa	--

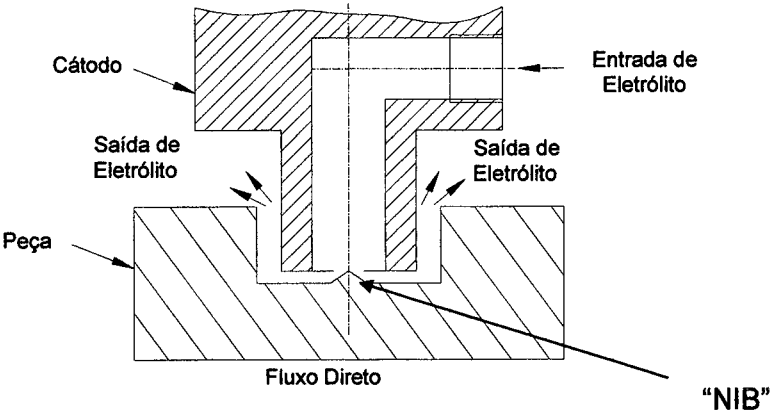
**QUADRO 12 - Materiais para revestimento de eletrodos ferramenta [14]**

O contato elétrico dos eletrodos deve ser realizado com muito cuidado para que uma má conexão elétrica não cause problemas no processo. Deve-se proceder a limpeza da área da peça e da ferramenta onde será estabelecido o contato para não criar resistências elevadas.

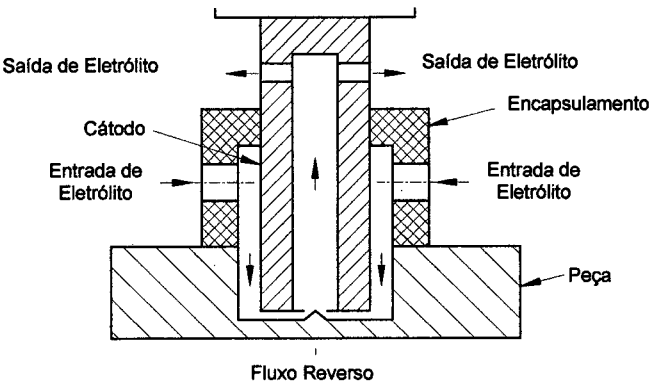
Estas resistências elevadas estabelecem uma grande queda de tensão na região de contato, afetando os parâmetros de controle podendo causar um aquecimento elevado, devido ao efeito Joule, que pode ocasionar dilatações térmicas do dispositivo causando perda de precisão dimensional na peça [3,5,8].

A condução e a retirada da solução eletrolítica da região de usinagem pode ser realizada de diversas formas. Os dispositivos podem ser abertos, onde a pressão de saída da solução eletrolítica é a ambiente, e fechado em câmara de pressão. Estes últimos permitem um fluxo não perturbado da solução eletrolítica com uma pressão de saída maior que a ambiente (figuras 18, 19 e 20) [3,5,6,8,10]. A retirada da solução eletrolítica da região de usinagem é importante pois deve promover a remoção dos produtos da usinagem e do calor gerado durante o processo [6].

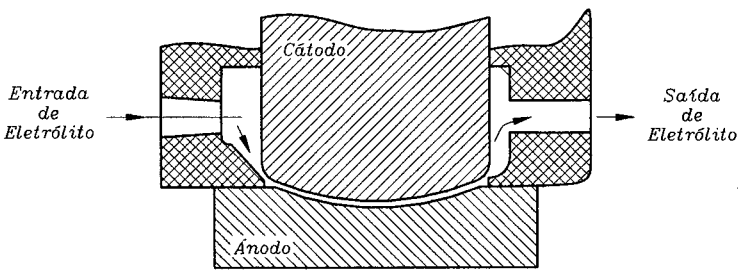
Os materiais adequados à fabricação dos dispositivos são os resistentes ao ataque corrosivo por parte das soluções eletrolíticas, como por exemplo o grafite, o aço inoxidável, o titânio e como revestimento protetor os plásticos e resinas reforçados com fibras de vidro [3,5,6,8,14].



**FIGURA 18 - Esquema de alimentação de solução eletrolítica por fluxo direto [8]**



**FIGURA 19 - Esquema de alimentação de solução eletrolítica por fluxo reverso [8]**



**FIGURA 20 - Esquema de alimentação de solução eletrolítica por fluxo cruzado [8]**

## 5.4 MECANISMO DE AVANÇO

Os mecanismos de avanço dos equipamentos de usinagem eletroquímica devem ser capazes de garantir um movimento relativo entre os eletrodos, regular e uniforme, sem a ocorrência de vibrações e oscilações. Estas podem ocasionar curtos-circuitos e assim afetar a qualidade dos resultados obtidos na usinagem. A velocidade de avanço deve ser regulável continuamente num intervalo de 0,1 a 24 mm/min [3,5,8,10,14].

Os mecanismos podem ser eletromecânicos ou eletrohidráulicos. Os sistemas eletrohidráulicos apresentam um movimento suave, livre de folga, alta velocidade de resposta e capacidade de desenvolver altas forças. Porém possuem um sério limitante: dificuldade de manter as velocidades de avanço constantes, em função de sua dependência da viscosidade, da temperatura, da pressão do fluido hidráulico e do diâmetro do orifício controlador de fluxo. Esta característica ocasiona um movimento de avanço intermitente e requer a utilização de válvulas hidráulicas servocontroladas [10].

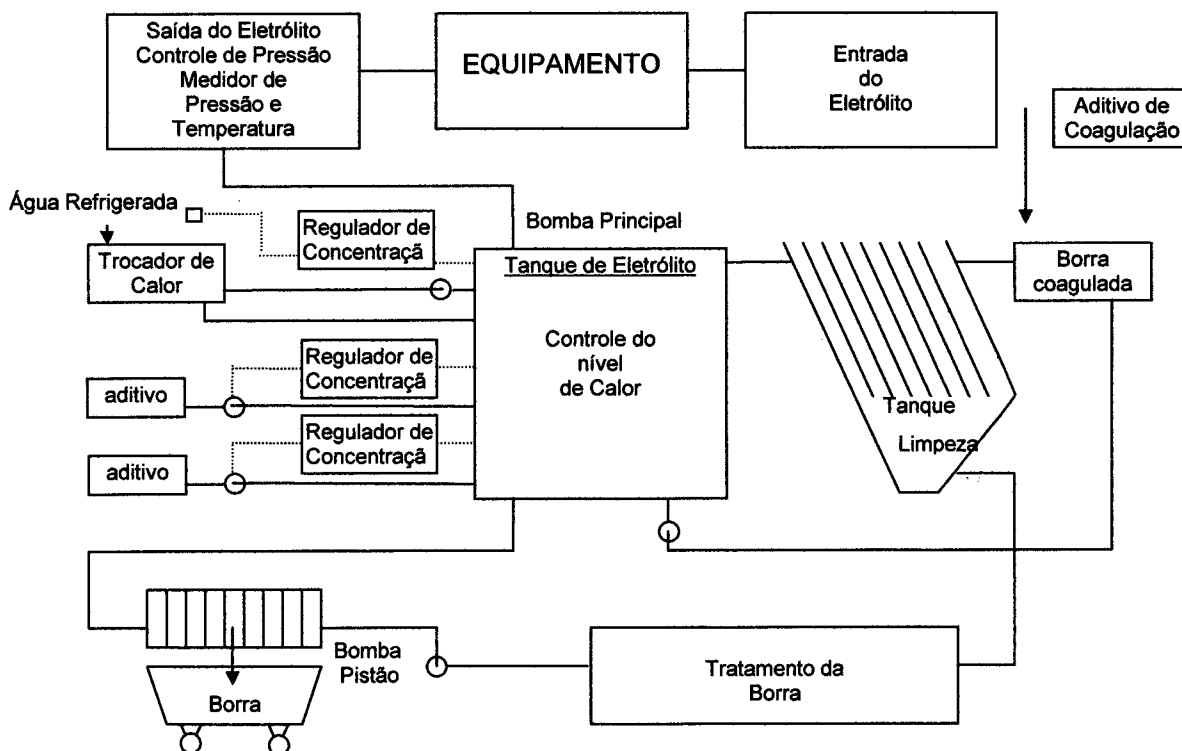
Os sistemas eletromecânicos consistem de um motor elétrico controlado, acoplado a um fuso de esferas recirculantes. Os sistemas eletromecânicos permitem um controle preciso da velocidade de avanço na faixa de velocidades desejada [10].

A utilização de um ou outro sistema depende do porte do equipamento devido às características distintas dos dois sistemas. O sistema eletromecânico é recomendado para equipamentos menores, onde as forças exercidas pela solução eletrolítica são menores que  $5 \times 10^4$  N e as velocidades se situam entre 0,2 e 24 mm/min. O sistema eletrohidráulico é recomendado para equipamentos maiores,

onde as forças são superiores a  $5 \times 10^4$  N e as velocidades se situam entre 0,05 e 3 mm/min [10].

## 5.5 UNIDADE ELETROLÍTICA

A unidade eletrolítica corresponde é responsável pelo suprimento, limpeza e recuperação da solução eletrolítica. É composta por sistemas de purificação, reservatórios, controladores de pressão, de temperatura, de fluxo e de pH e pelas bombas de suprimento. A figura 21 apresenta, de forma esquemática, uma unidade eletrolítica [3,5,6,8,10,14].



**FIGURA 21** - Representação esquemática de uma unidade eletrolítica [16]



*Reservatórios* - os reservatórios devem ser construídos em materiais resistentes à ação corrosiva das soluções eletrolíticas utilizadas. Servem para armazenar a solução eletrolítica nova, a utilizada e a recuperada para posterior aproveitamento. O número de reservatórios depende da complexidade do equipamento de usinagem, sendo necessário um mínimo de dois. Os reservatórios devem ter uma capacidade de armazenamento suficiente para suprir o sistema durante os procedimentos de usinagem sem perigo de falta da solução eletrolítica [3,5,6].

*Bombas* - as bombas responsáveis pelo suprimento da solução eletrolítica devem ser construídas em materiais resistentes à corrosão e capazes de fornecer um fluxo constante de solução eletrolítica à região de usinagem. As pressões utilizadas em equipamentos industriais de grande porte de usinagem eletroquímica se situam na faixa de 5 a 50 bar e as vazões na faixa de 100 a 800 l/min [6].

*Sistemas de purificação* - a purificação da solução eletrolítica é fundamental para um bom resultado da usinagem eletroquímica. Na utilização de sais, a maior parte dos produtos da dissolução anódica precipita na forma de uma fina borra. A precipitação desta borra pode ser acelerada pela adição de floculantes ou através de sistemas centrífugos. A separação da borra da solução eletrolítica é feita mecanicamente em filtros de prensagem.

Com relação ao descarte da solução eletrolítica, a literatura faz referência à seis métodos, ou até mesmo, uma combinação destes, os quais serão descritos a seguir [3,5,6,8]:

1 - O DESCARTE PURO E SIMPLES DA SOLUÇÃO ELETROLÍTICA. Após a utilização a solução eletrolítica é descartada e eliminada. Este método é utilizado com soluções eletrolíticas de baixo custo, como as à base de NaCl, e instalações pequenas com baixo consumo de soluções.

2 - A SEPARAÇÃO POR CENTRIFUGAÇÃO, uma solução cara, é utilizada onde o espaço disponível é pequeno por ser de instalação compacta.

3 - A SEDIMENTAÇÃO dos produtos da usinagem é lenta, de baixo custo. A desvantagem é que ocupa grandes espaços devido à pequena taxa de sedimentação.

4 - A CLARIFICAÇÃO é um sistema de sedimentação com taxa de sedimentação acelerada, pela utilização de clarificadores e floculantes. O espaço utilizado é menor do que a sedimentação, sendo comparável ao utilizado pela centrifugação para a mesma capacidade de limpeza.

5 - O FILTRO PRENSA atua através da compressão da solução eletrolítica através de um filtro formando os bolos de borra sólida posteriormente descartados.

6 - O SISTEMA DE FILTRAGEM CONTÍNUA POR VÁCUO também forma bolos sólidos de borra posteriormente descartados.

*Sistemas de controle* - Para garantir um bom resultado na usinagem eletroquímica os sistemas de controle do sistema eletrolítico se dividem em controle da pressão de entrada e saída, da temperatura, do pH e do fluxo da solução eletrolítica. A pressão é controlada através de manômetros e válvulas de controle. A temperatura é controlada por termopares e trocadores de calor para manter a temperatura dentro da faixa de trabalho (32 a 52 °C). O pH pode ser controlado e corrigido pelo operador. O fluxo é controlado por rotâmetros e válvulas de controle de fluxo para manter o fluxo dentro do valor determinado e na faixa de utilização (geralmente 0,9 l/min para cada 100 A) [3,5,6,10].

## 5.6 SISTEMAS DE CONTROLE

O sistema de controle nos processos de usinagem eletroquímica deve manter os ajustes pré-determinados dos parâmetros de processo de maneira a se obter a precisão, acabamento superficial, taxa de remoção e outros índices de desempenho desejados [10].

Geralmente o sistema de controle de equipamentos de usinagem eletroquímica inclui subsistemas de controle de fornecimento de solução eletrolítica, do movimento e posicionamento do eletrodo ferramenta, da abertura do "gap", da fonte de alimentação e da prevenção de curto-circuito. O subsistema de controle de fornecimento de solução eletrolítica ainda pode controlar vários fatores, como a pressão de entrada e saída da solução eletrolítica, a temperatura de entrada e saída, a concentração, o pH e principalmente o fluxo da solução eletrolítica.

## **CAPÍTULO 6**

### **DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL**

No Brasil apenas a firma Robert Bosch Ltda fabrica equipamentos industriais de usinagem eletroquímica e na Universidade Federal de Uberlândia-UFU, foi desenvolvido um protótipo para a pesquisa do processo de usinagem eletroquímica. Não foram encontradas informações de equipamentos de pequeno porte para a execução de furo unitário na faixa de diâmetro de 0,5 a 2,0 mm.

Para a realização deste trabalho foi necessário o desenvolvimento e construção de um equipamento de usinagem eletroquímica.

#### **6.1 DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO**

O desenvolvimento do equipamento foi orientado no sentido de se construir um equipamento compacto e de simples operação, com capacidade de atender as necessidades do trabalho. A descrição do desenvolvimento do equipamento seguirá o ordenamento do capítulo 5, descrevendo as necessidades, objetivos e as soluções utilizadas.

A concepção do equipamento exigiu que se estabelecesse inicialmente as funções a ele atribuídas. Como se trata de um equipamento experimental, no qual deverá ser verificada a funcionalidade do processo de usinagem eletroquímica de furos de 0,5 a 2,0 mm de diâmetro, com uma profundidade de até 2,0 mm, optou-se por um sistema com apenas um eixo controlado. Como ferramenta foram

selecionados tubos de aço inoxidável martensítico em diâmetros variáveis de 0,6 à 2,0 mm. A fonte de alimentação foi dimensionada para uma densidade de corrente máxima de  $318 \text{ A/cm}^2$ . A vazão e a pressão da solução eletrolítica foi dimensionada em 215 l/h e 2 metros de coluna de água. A seguir são apresentados os detalhes das exigências feitas a cada um dos subsistemas e as soluções empregadas.

### 6.1.1 Estrutura

A estrutura de uma máquina de usinagem eletroquímica deve resistir aos esforços de avanço do eletrodo e ao ataque por parte da solução eletrolítica. Para a dimensão dos eletrodos e a pressão de alimentação da solução eletrolítica de 2 metros de coluna de água, tem-se uma força de avanço máxima de aproximadamente 0,0016 N. Para tanto necessita-se de uma estrutura de pequena resistência mecânica com guias de baixo atrito e pequenas folgas. Tendo disponível um microscópio DFV-Leitz, descartado pelo ataque de fungos ao sistema de lentes, verificou-se que as propriedades da estrutura deste satisfaziam as exigências do equipamento em desenvolvimento.

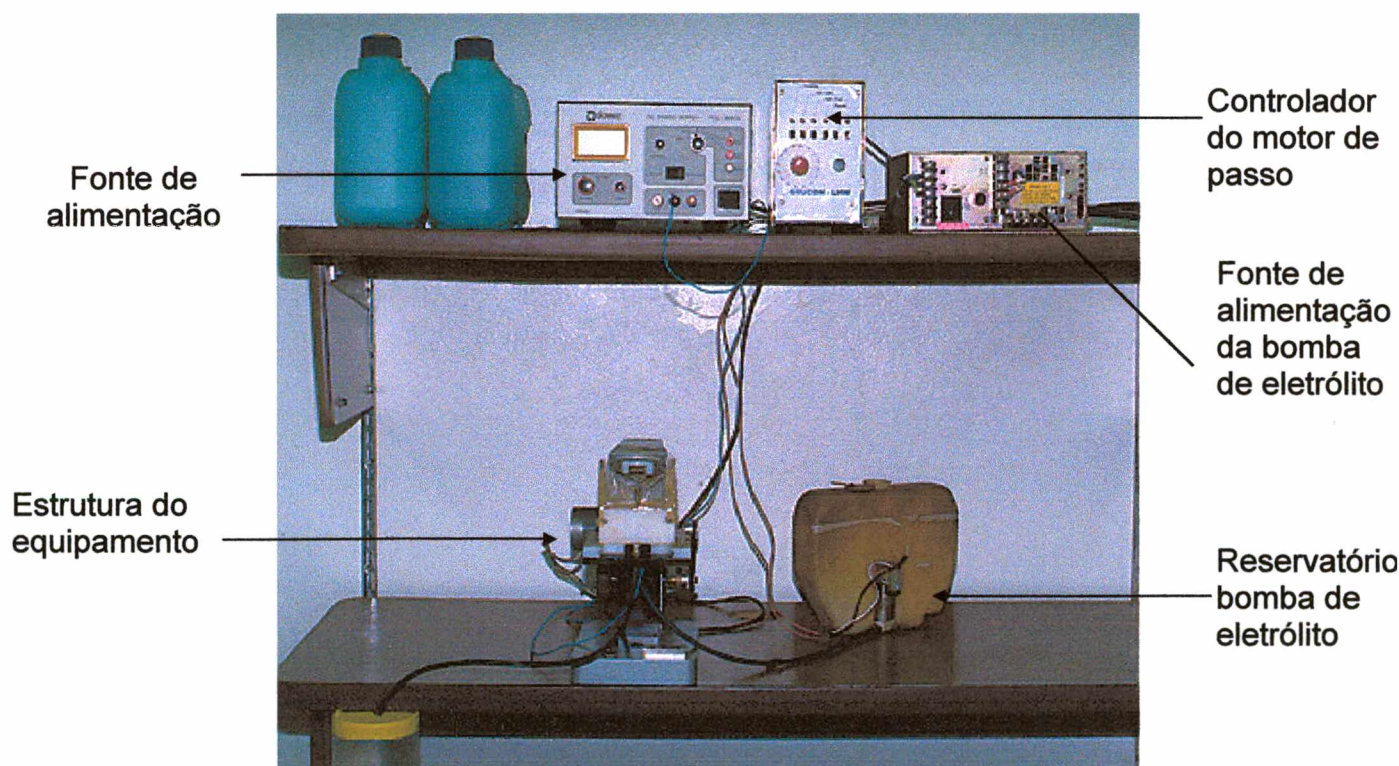
As dimensões da estrutura do microscópio que foi utilizado no desenvolvimento do equipamento são compactas 150 x 250 x 280 mm, respectivamente de largura, comprimento e altura. A estrutura em forma de C, construída em bloco de alumínio fundido, e pintada com uma tinta de boa qualidade, dispunha de uma mesa com avanço vertical acionada por um sistema de pinhão cremalheira com guias lineares. O curso da mesa de 30 mm satisfazia as exigências

do curso necessário para os furos a serem executados, bem como a possibilidade da permuta de ferramentas.

Na parte superior da estrutura em forma de C foi adaptado o dispositivo de posicionamento e fixação do eletrodo peça. Este dispositivo foi confeccionado em nylon (Technyl™).

Sobre a mesa, com deslocamento vertical, foi montada uma cuba de Technyl™ em cuja parte central se encontra o suporte do eletrodo-ferramenta. Um manípulo de controle manual da altura da mesa foi substituído por uma engrenagem para correia dentada. Na parte posterior da estrutura foi adaptado um motor de passo, acoplado por uma correia dentada ao eixo de acionamento do movimento da mesa.

A figura 22 apresenta uma visão geral do equipamento.



**FIGURA 22** - Vista geral do equipamento desenvolvido para usinagem eletroquímica



### 6.1.2 Fonte de Alimentação

A usinagem eletroquímica requer fontes de tensão e corrente contínuas com variação contínua da tensão ou corrente. A fonte deve garantir a manutenção da grandeza escolhida. A faixa de seleção de valores para a tensão deve ser entre 5 a 30 V e a corrente deve atender a densidades de corrente no intervalo de 8 a 465 A/cm<sup>2</sup>. No caso dos furos a serem produzidos, esta corresponde a correntes máximas de 5 A. A partir destes dados adquiriu-se uma fonte de alimentação da marca Dower de 5 A, cujas especificações se encontram nos anexos.

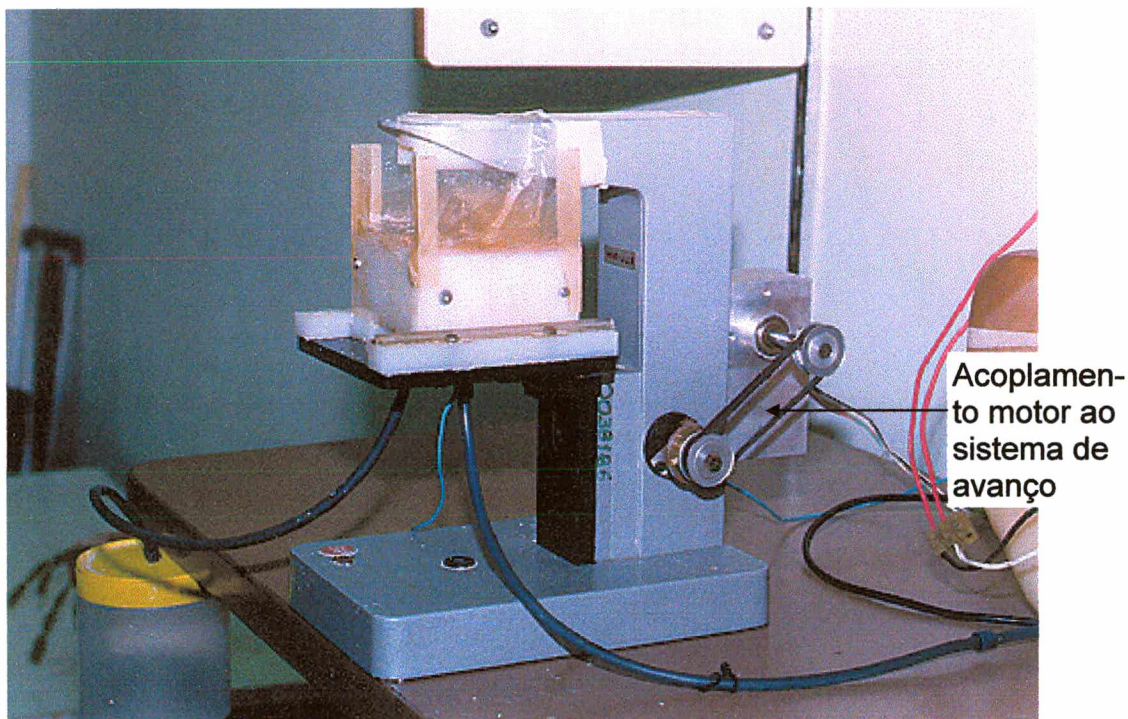
### 6.1.3 O Mecanismo de Avanço

O mecanismo de avanço é composto por um sistema de pinhão e cremalheira com um curso total de aproximadamente 30 mm, onde cada volta do pinhão representa um deslocamento linear da mesa de 3 mm. A este mecanismo inicialmente foi adaptado um motor de corrente contínua, da marca Bosch (especificações se encontram nos anexos). Este, para pequenas tensões de acionamento, apresentou problemas de falta de força para movimentação da mesa sendo substituído por um motor de passo (características nos anexos), controlado por um “drive”, desenvolvido pelo LHW-GRUCON-UFSC, que permitia variar continuamente a velocidade de avanço, na faixa de 0,560 mm/min até 2,0 mm/min.

A montagem do motor e o acoplamento deste ao eixo do pinhão é apresentado na figura 22. O mecanismo de avanço também pode ser acionado manualmente, mesmo com o motor de passo em funcionamento (figura 24).

### 6.1.4 Sistemas de Controle

Neste equipamento os sistemas de controle existentes se limitam aos específicos da fonte de tensão e de corrente e do “drive” do motor de avanço.

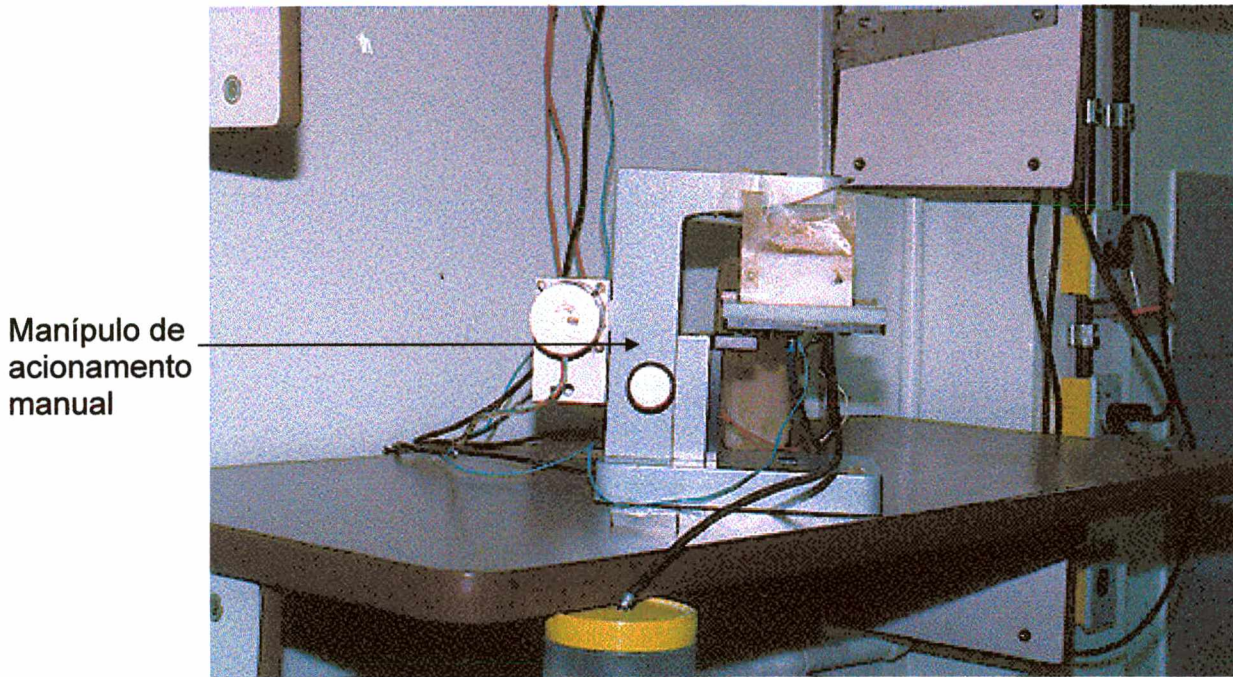


**FIGURA 23** - Vista lateral esquerda do equipamento destacando o acoplamento do motor ao eixo do pinhão

Sistemas automáticos de prevenção de curto-circuito e pressão da solução eletrolítica deverão ser desenvolvidos no futuro. O controle do curto-circuito é realizado visualmente através de um multímetro digital. No equipamento desenvolvido os valores de tensão, corrente e condição de trabalho do motor de avanço podem ser adquiridos automaticamente por um microcomputador, para posterior levantamento



estatístico. Quando a corrente sobe a valores próximos ao limite da fonte, o equipamento é desligado manualmente.



**FIGURA 24** - Vista lateral direita do equipamento destacando o manipulador para acionamento manual.

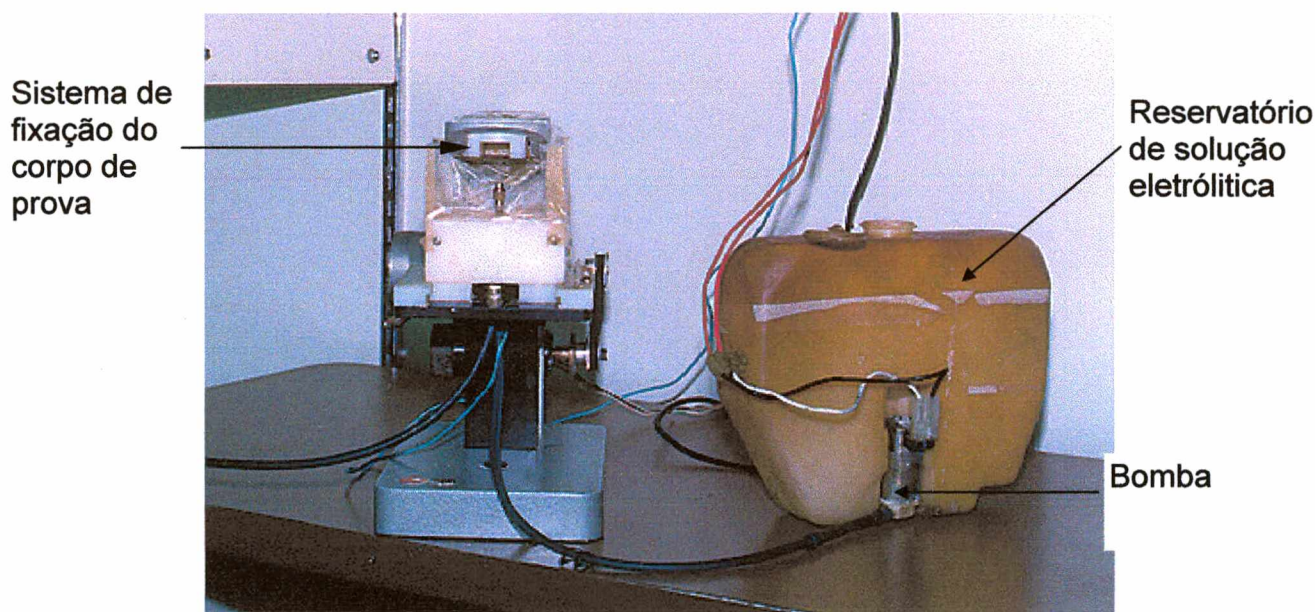
#### 6.1.5 Unidade Eletrolítica

Conforme anteriormente a unidade eletrolítica é responsável pelo suprimento, limpeza e recuperação da solução eletrolítica. Em ensaios preliminares determinou-se que para a execução de um furo, nas dimensões utilizadas neste trabalho, necessitava-se entre 0,5 à 1,5 litros de solução eletrolítica. Disponha-se para o equipamento de um reservatório com capacidade de 2 litros de solução eletrolítica acoplado a uma bomba com vazão de 215 l/h para 2 metros de coluna de água. No

equipamento desenvolvido a unidade eletrolítica ficou constituída das seguintes partes:

**Reservatórios** - um reservatório de armazenamento de solução eletrolítica nova com uma capacidade de 2 litros, construído em material plástico e contendo integrada uma bomba (características nos anexos) conforme, figura 25. A solução eletrolítica já utilizada era coletada em reservatórios de material plástico com capacidade de 0,5 litros.

**Sistema de purificação** - Devido às pequenas quantidades de solução eletrolítica utilizadas em processo optou-se pelo descarte puro e simples da solução eletrolítica utilizada. Atendendo as exigências ambientais a neutralização e o descarte foram realizados pelo Departamento de Química da UFSC.

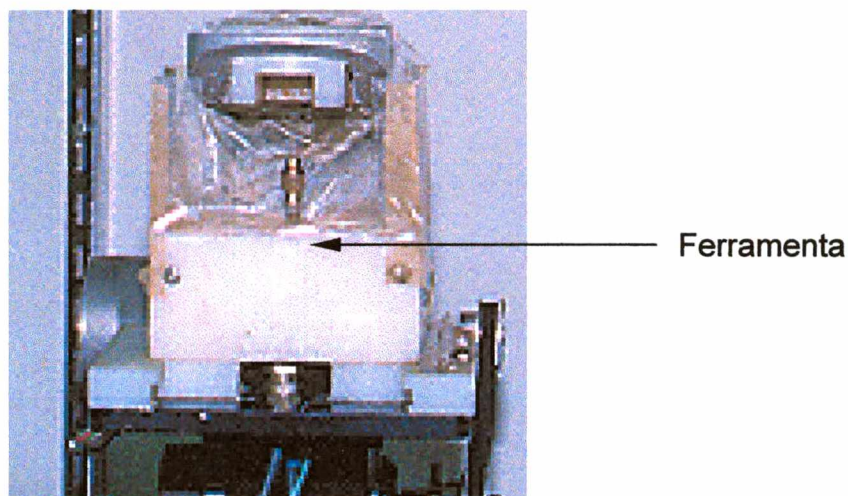


**FIGURA 25** - Vista frontal do equipamento com destaque para reservatório e bomba da solução eletrolítica



### 6.1.6 Eletrodo-Ferramenta

Os eletrodos-ferramenta tubulares, com diâmetros na faixa de 0,8 a 1,2 mm eram de aço inoxidável. Foram empregadas agulhas hipodérmicas veterinárias, que atendiam à faixa de diâmetro requeridas. As agulhas eram cortadas de forma que apresentassem a parte frontal reta. A agulha eletrodo tinha o corpo nú sem revestimentos. A agulha eletrodo era acoplada a um suporte na parte central da cuba coletora da solução eletrolítica, conforme a Figura 26.



**FIGURA 26** - Vista da ferramenta utilizada instalada na parte central da cuba coletora da solução eletrolítica

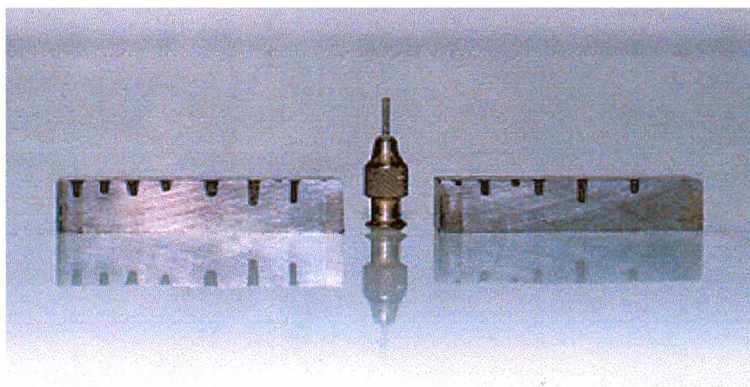
### 6.1.7 Dispositivos Auxiliares

Foi desenvolvido um dispositivo para a fixação do corpo de prova a ser usinado. Este dispositivo foi confeccionado em Technyl™ e adaptado ao local onde anteriormente eram fixadas as objetivas do microscópio (figura 25). Este dispositivo

era responsável pelo posicionamento e fixação do corpo de prova não contando com possibilidade de movimentação em processo.

#### 6.1.8 Corpos de prova

Os corpos de prova para os ensaios são de aço rápido, para demonstrar a capacidade de furação, pelo processo, de um aço de elevada dureza. Pela facilidade de obtenção foram escolhidos “bits” de 3/8 de polegada (~10 mm) montados aos pares no dispositivo de fixação. A figura 27 mostra corpos de prova já furados.



**FIGURA 27** - Corpos de prova já usinados com a ferramenta utilizada

## **CAPÍTULO 7**

### **DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS**

Os ensaios para a avaliação do processo de usinagem eletroquímica na obtenção de furos foram realizados com o equipamento descrito no capítulo 6, utilizando-se eletrólito à base de cloreto de sódio, NaCl, e a peça obtida de um 'bit' de aço-rápido com 10% de Co.

No planejamento dos ensaios utilizou-se o projeto fatorial  $2^k$ , onde temos K fatores envolvidos, sendo cada um a dois níveis.

Os resultados são mostrados no decorrer deste capítulo, onde serão apresentadas as condições de trabalho e fotos ilustrativas dos ensaios realizados.

#### **7.1 ESPECIFICAÇÃO DO ELETRÓLITO**

Como eletrólito foi utilizada uma solução à base de cloreto de sódio, NaCl, puro de análise e água destilada. Em relação às concentrações, foram ensaiadas duas concentrações:

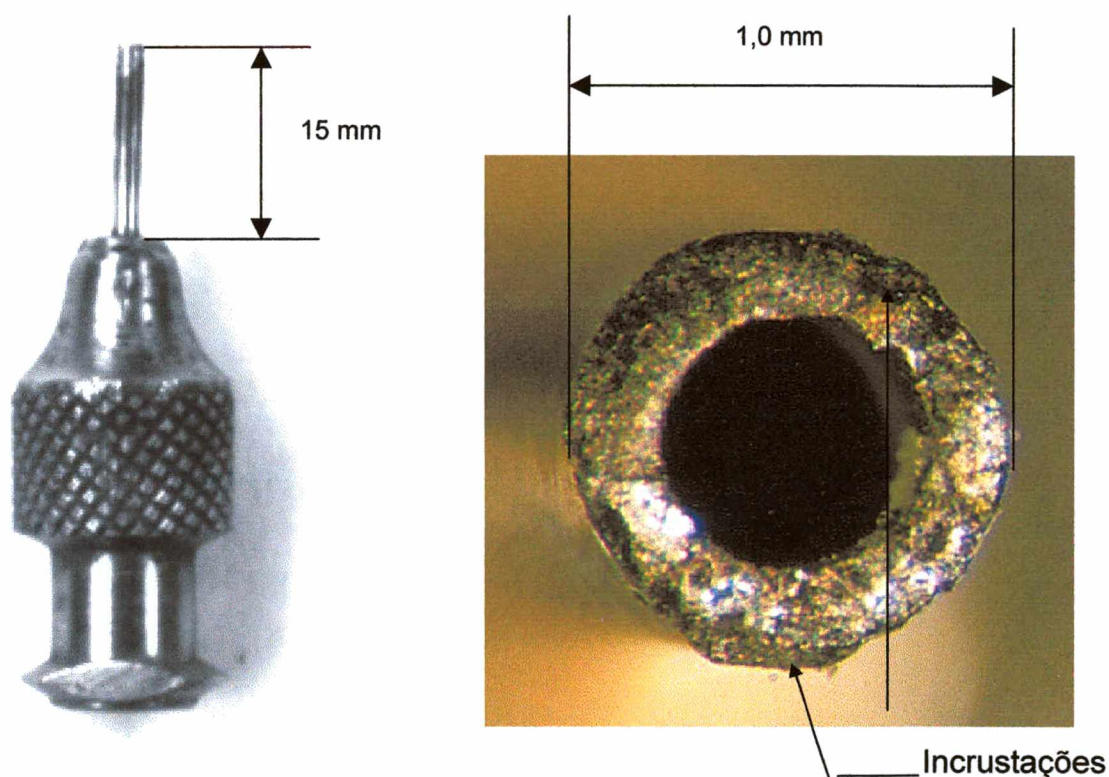
- 1 - Solução a 10% de NaCl em peso composta de 900g de água destilada e 100g de NaCl
- 2 - Solução a 15% de NaCl em peso composta de 850g de água destilada e 150g de NaCl



## 7.2 ESPECIFICAÇÃO DO ELETRODO

Como eletrodo foram utilizadas agulhas hipodérmicas de aço inoxidável com diâmetro externo de 1 mm, tendo como diâmetro interno 0,6 mm.

Para permitir a obtenção de furos com fundo plano e garantir uma distribuição radial uniforme as agulhas tiveram a sua ponta cortada. Para reduzir as amplitudes de vibração e adequar o comprimento das agulhas ao equipamento de usinagem, elas tiveram o seu comprimento reduzido à 15 mm.



**FIGURA 28** - Vista lateral e superior do eletrodo

A Figura 28 apresenta uma vista lateral da agulha hipodérmica já preparada para servir de eletrodo e também uma vista superior ampliada da ponta de uma ferramenta já utilizada.

7.3 CORPO DE PROVA

Um dos objetivo deste trabalho foi desenvolver uma técnica de furação para a análise de tensões residuais pelo método do furo cego. Particularmente os materiais temperados apresentam uma maior dificuldade de usinagem. Em vista deste fato, foi escolhido, como material para os ensaios, o aço rápido com 10 % de cobalto, características no quadro 13.Os 'bits' foram adquiridos no comércio e eram da marca 'ADES'.

	C	W	Mo	V	Co	Cr	Si	Ma	P	S	Fe
%	0,75-	17,20-	.-	1,30-	9,50-	3,50-	<0,5	<0,40	<0,03	<0,03	62,59-
	0,85	18,70		1,80	10,50	4,50					66,79

• Classificação

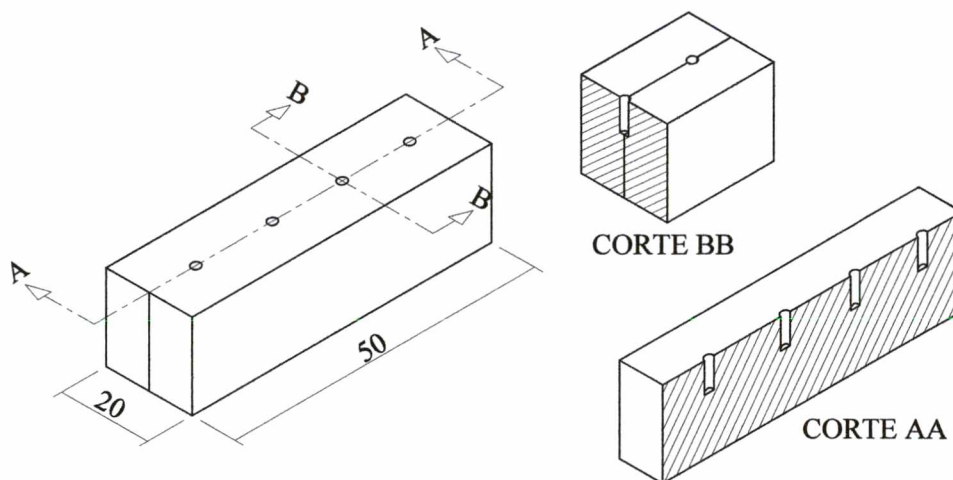
ISO S6

AISI T5

DIN HS 18-0-1-10

QUADRO 13 - Composição Química e Classificação do aço-rápido 10% de Co [19]

Os corpos de prova foram obtidos a partir de 'bits' com dimensões de 3/8" x 4" (10 x 101 mm) montados aos pares. Os furos foram realizados em cima da linha de união entre as duas partes do corpo de prova, conforme mostrado no corte BB da Figura 29, permitindo, após o ensaio, uma perfeita visualização da forma do furo obtido, conforme observado no corte AA da Figura 29.



**FIGURA 29** – Vistas e cortes esquemáticos de um corpo de prova com indicação da localização das usinagens.

#### 7.4 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRABALHO

Parâmetros de trabalho são todos os parâmetros que influem no resultado do processo de usinagem eletroquímica. A correta escolha e dimensionamento destes parâmetros, proporciona a obtenção de melhores resultados. Estes parâmetros na usinagem eletroquímica consistem em:

- pH do eletrólito;
- Composição e concentração do eletrólito;
- Pressão de entrada e saída do eletrólito;
- Fluxo de eletrólito;
- Temperatura de entrada do eletrólito;



- Velocidade de avanço do eletrodo-ferramenta;
- Diferença de potencial ou corrente utilizada.

Devido ao fato do equipamento desenvolvido ser experimental não permitindo assim, maiores variações nos controles e ajustes, os parâmetros que sofreram variação foram:

- A diferença de potencial;
- Velocidade de avanço do eletrodo-ferramenta;
- Composição e concentração do eletrólito.

Os demais parâmetros não sofreram variação, de maneira que foram considerados constantes durante os ensaios.

Os valores dos parâmetros utilizados durante a realização dos ensaios foram:

- Composição do eletrólito; solução de cloreto de sódio puro de análise e água destilada;
- Concentração do eletrólito; 10 e 15% em peso;
- Diferença de potencial entre eletrodos foram utilizados 5, 10 e 15V;
- Velocidade de avanço do eletrodo-ferramenta - durante os ensaios utilizou-se três velocidades de avanço do eletrodo ferramenta, velocidades estas mantidas constantes durante os ensaios. As velocidades selecionadas foram 0,56 mm/min, 0,78 mm/min e 1,13 mm/min.

## 7.5 CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO DOS ENSAIOS

Conforme visto no capítulo 3, os principais requisitos do processo de furação para a obtenção de furos para utilização no método do furo cego são os seguintes:

- A forma geométrica do furo obtida pelo processo
- A não introdução de novas tensões residuais à peça

No caso da usinagem eletroquímica, o requisito da não introdução de novas tensões residuais à peça é plenamente atingido. Já o requisito forma geométrica do furo, utilizado como critério de avaliação, depende grandemente dos parâmetros e condições utilizados durante a usinagem para se obter formas adequadas à utilização deste furo na medição de tensões residuais pelo método do furo cego.

Desta forma utilizou-se para a avaliação dos resultados obtidos nos ensaios o seguinte critério: *FORMA GEOMÉTRICA DO FURO*

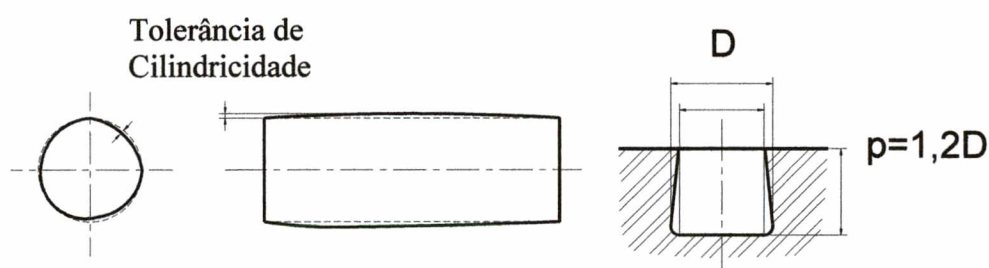
### 7.5.1 Critério Forma Geométrica do Furo

Um dos principais requisitos para o processo de furação ser adequado para a utilização no método do furo cego de medição de tensões residuais é a forma geométrica do furo obtida no processo. As características da forma geométrica do furo, nas formulações da medição de tensão residuais, são idealizadas. A solução de Kirsch, por exemplo, considera um furo perfeitamente cilíndrico, perpendicular à superfície e passante.[1] Em condições reais, entretanto, o furo não pode ser passante e existe a possibilidade de erros de forma geométrica.

Desta forma, para que o modelo de cálculo possa ser corretamente aplicado, é necessário que a geometria do furo seja bem definida e conhecida. Assim o furo,

para poder ser utilizado na medição de tensões residuais pelo método do furo cego, deve possuir como características geométricas, fundo plano, cilíndrico, perpendicular a superfície e possuir diâmetro e profundidade bem conhecidos.

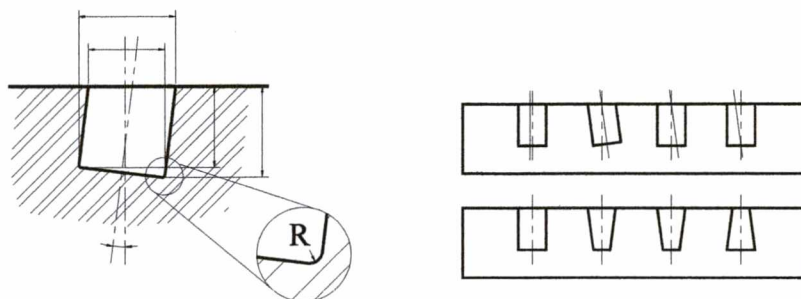
A Figura 30 apresenta algumas considerações sobre cilindridade e suas distorções como; diâmetro inferior ( $d$ ) maior que o superior ( $D$ ) ou, no caso da ECM, o diâmetro superior ( $D$ ) maior que o inferior ( $d$ ); embarrigamento na região central do furo e indicando que, com citado no capítulo 3, a profundidade deve se situar em torno de 1,2 vezes o diâmetro.



**FIGURA 30** - Considerações sobre distorções na cilindridade [1]

A Figura 31 apresenta as distorções possíveis de se observar no perpendicularismo do furo como os furos cônicos, com paredes inclinadas, inclinados em relação ao eixo normal e arredondamentos de cantos que podem chegar em casos extremos ao fundo esférico.

## PERPENDICULARISMO



**FIGURA 31** - Considerações sobre distorções no perpendicularismo [1]

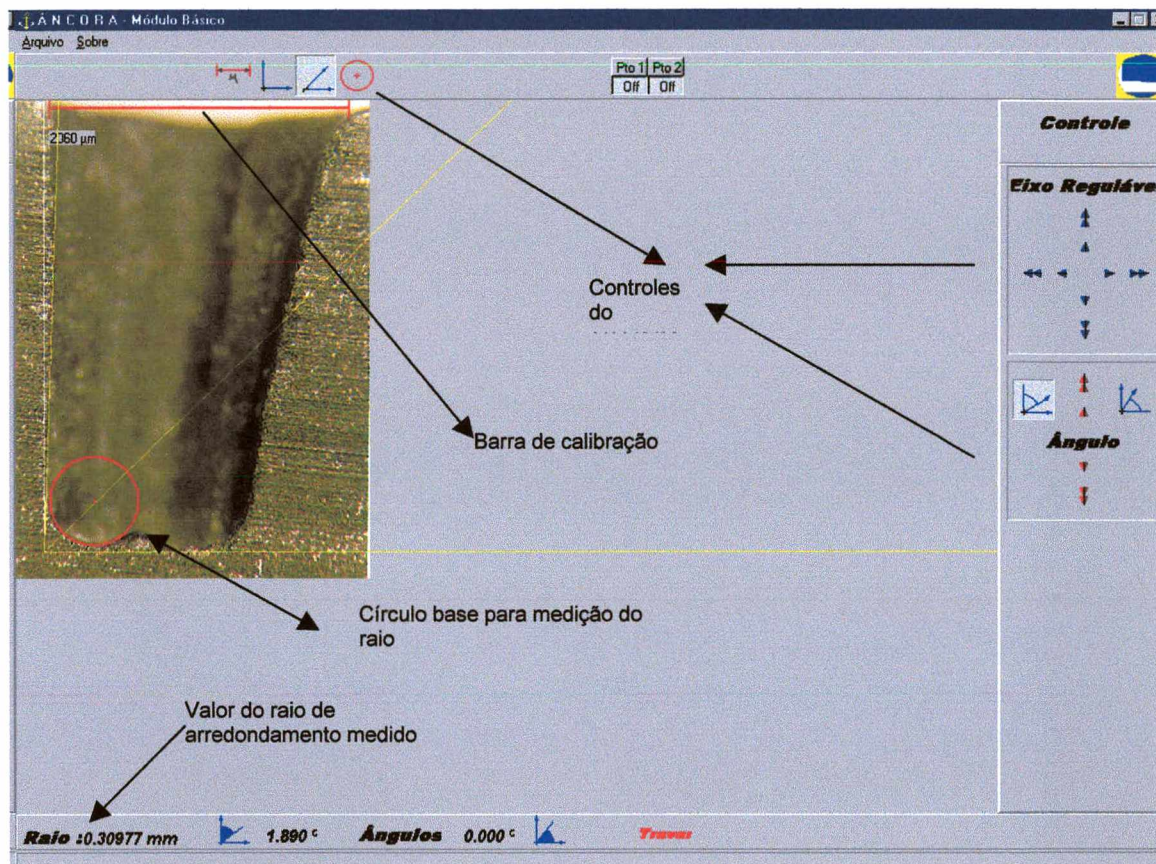
Em casos de geometrias que possuam repetibilidade, podem ser desenvolvidos coeficientes de correção. Assim a repetibilidade da forma obtida é importante para a adequação de um processo de usinagem que vise a sua utilização para a obtenção de furos a serem utilizados no método de medição de tensões residuais pelo método do furo cego.

## 7.6 METODOLOGIA DE MEDIÇÃO DAS GRANDEZAS GEOMÉTRICAS

Na medição das grandezas geométricas para avaliação da forma geométrica dos furos obtidos através da usinagem eletroquímica como, por exemplo, o diâmetro da boca dos furos, o diâmetro interno dos furos, o raio do arredondamento dos cantos, a altura dos 'nibs' e outros utilizados para a avaliação da forma geométrica foi utilizado um programa experimental, ÂNCORA, desenvolvido para o Laboratório de Mecânica de Precisão originalmente para medição do raio de quina de eletrodos utilizados na eletroerosão por faísca.

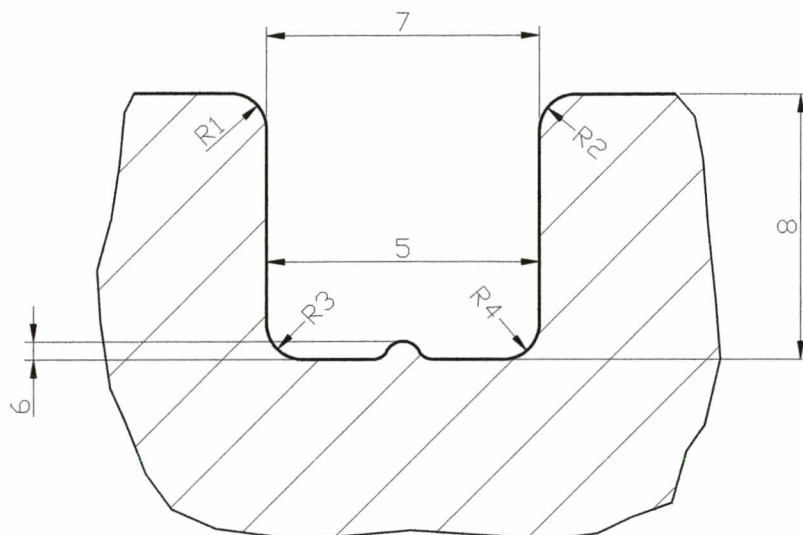


Com este programa através de ações interativas foram realizadas as medições dos valores utilizados para se avaliar os furos obtidos pelo critério da forma geométrica. A Figura 32 mostra a tela do programa ÂNCORA com a imagem de um furo usinado eletroquimicamente tendo o raio de arredondamento medido.



**FIGURA 32** – Tela do programa de medição ÂNCORA com a realização da medição do raio de arredondamento de um furo obtido através de usinagem eletroquímica.

As posições onde foram realizadas as medições das grandezas geométricas nos furos obtidos nos ensaios são apresentadas na Figura 33.



**FIGURA 33** – Posição para medição das grandezas geométricas dos furos obtidos nos ensaios através do programa ÂNCORA.

R1 – raio de arredondamento de borda esquerdo

R2 – raio de arredondamento de borda direito

R3 – raio de arredondamento de fundo esquerdo

R4 – raio de arredondamento de fundo direito

5 – diâmetro do furo na linha de arredondamento de fundo

6 – altura do 'nib'

7 – diâmetro do furo na entrada da ferramenta

8 – profundidade do furo.

## 7.7 METODOLOGIA DE PRÉ-ENSAIO

No planejamento dos pré-ensaios utilizou-se o procedimento de um projeto fatorial  $2^k$ .

O projeto fatorial  $2^k$  é utilizado nos estágios iniciais de um trabalho experimental, quando existem muitos fatores a serem examinados. Este projeto



oferece a menor quantidade de combinações de tratamento que permitem o estudo de  $k$  fatores em um arranjo fatorial completo.

Devido à existência de somente dois níveis para cada fator, deve-se assumir que a resposta é aproximadamente linear dentro do intervalo escolhido para os níveis dos fatores [20].

O modelo estatístico para o projeto  $2^k$  inclui  $k$  efeitos principais ( $k/2$ ) interações de dois fatores, ( $k/3$ ) interações de três fatores, ..., uma interação de  $k$  fatores. Deste modo, para o projeto  $2^k$ , o modelo completo pode conter  $2^{k-1}$  efeitos. As combinações de tratamentos são escritas na ordem padrão introduzindo-se dos fatores um por vez; sendo cada novo fator sucessivamente combinado com os anteriores [ 20].

Desta forma, para o ensaio utilizou-se um projeto fatorial  $2^3$  com quatro replicações e com três fatores (concentração de eletrólito (A), velocidade de avanço da ferramenta (B) e tensão aplicada (C)), com dois níveis para cada fator ( alto (+) ou baixo (-) ). A ordem padrão é: (1), a, b, ab, c, ac, bc, abc. Nessa notação, por exemplo, ab representa a combinação de tratamentos onde A e B estão em seus níveis altos e C estão em seu nível baixo [ 20].

Além dos fatores utilizados na análise estatística durante os ensaios também foram anotados o tempo de usinagem e a corrente atingida.

## 7.8 RESULTADO DOS ENSAIOS

Os resultados dos ensaios serão divididos de acordo com a concentração (10 e 15 %), utilizada no eletrólito e dentro desta divisão pela tensão ( 5, 10 e 15 V) e

velocidades ( 0,56, 0,78 e 1,13 mm/min) utilizadas durante os ensaios realizados com os corpos de prova.

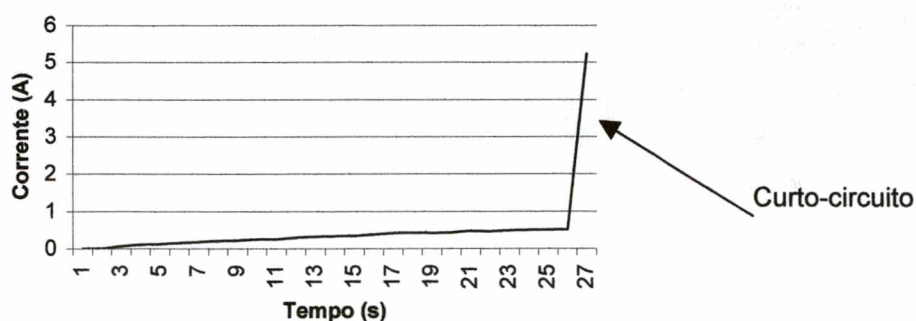
### 7.8.1 Eletrólito com concentração 10%

#### a – Tensão aplicada 5 V

Com a utilização de uma tensão aplicada igual a 5 V, com a concentração do eletrólito igual a 10 %, não se obteve bons resultados na furação em nenhuma das três velocidades de avanço da ferramenta aplicadas, 0,56, 0,78 e 1,13 mm/min.

Nas velocidades de 0,78 e 1,13 mm/min ocorria, pouco tempo após o início do processo de furação, como pode ser observado na Figura 34, um curto-circuito devido ao contato entre a ponta da ferramenta e o corpo de prova. Este contato acontecia devido a velocidade de deslocamento da ferramenta ser maior que a taxa de remoção de material durante a usinagem.

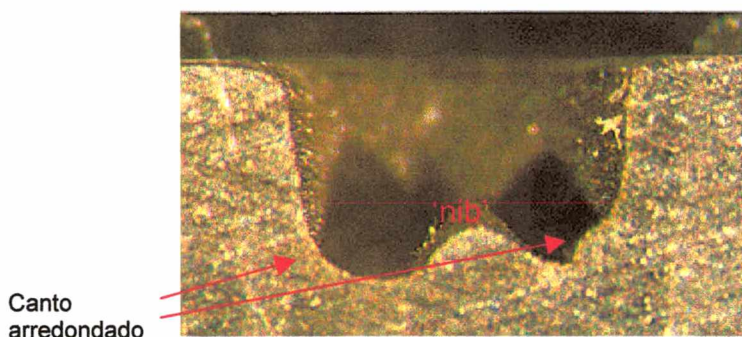
Deste modo nestas velocidades não foi possível a realização de usinagens devido ao fato das velocidades utilizadas no avanço da ferramenta não serem adequadas a tensão aplicada.



**FIGURA 34** - Gráfico de um ensaio onde ocorreu curto-circuito logo após o início da usinagem. (  $v_f = 0,78$  mm/min,  $V = 5$  V, concentração 10% NaCl )

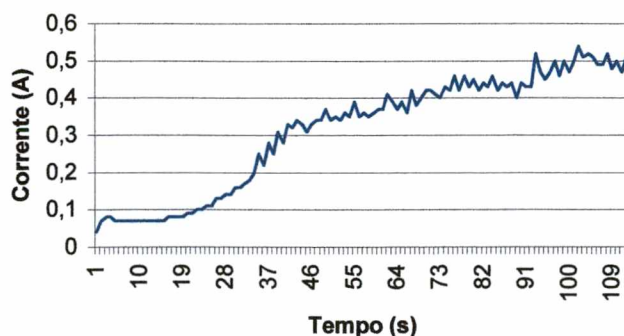


Utilizando-se a velocidade de 0,56 mm/min conseguiu-se manter a usinagem por mais tempo. Os furos realizados nestas condições apresentaram-se com formato de sino invertido, com paredes laterais inclinadas e fundo com cantos arredondados apresentando 'nib' conforme pode ser observado na Figura 35, que apresenta um dos furos obtidos nestas condições de usinagem.



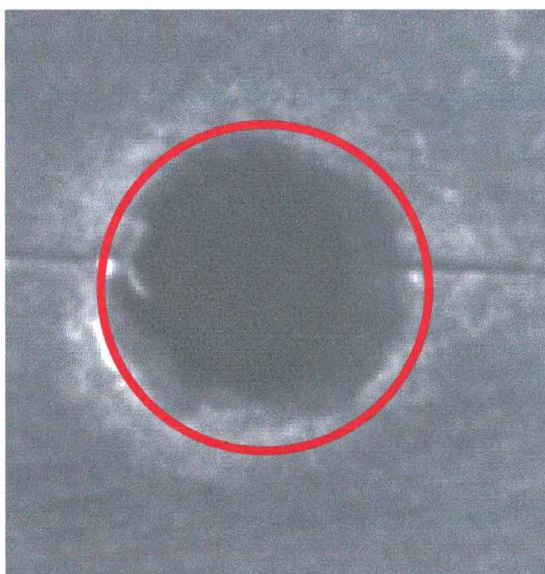
**FIGURA 35** – Furo realizado com  $V_f = 0,56$  mm/min,  $V = 5$  V e concentração 10% NaCl

O gráfico da variação da corrente de usinagem pelo tempo de usinagem característico dos ensaios sob estas condições de usinagem são semelhantes ao da Figura 36 que representa o gráfico do furo da Figura 35.



**FIGURA 36** – Gráfico de usinagem realizada com velocidade de avanço da ferramenta de 0,56 mm/min, tensão de 5 V e concentração do eletrólito igual a 10% de NaCl

A corrente média das usinagens realizadas nestas condições foi de 0,37 A com desvio médio de 0,136 e o desvio padrão de 0,162 demonstrando uma variação pequena entre os valores obtidos nos diversos ensaios. O diâmetro na parte superior do furo se situou na faixa de 1,30 a 1,83 mm e na parte inferior, na linha do início do arredondamento do canto, entre 1,00 a 1,40 mm, o que confirma a forma aproximada de um sino. O fundo apresentou 'nib' central e cantos arredondados. Os furos realizados sob estes parâmetros apresentam pequena variação na circularidade apresentando uma saída uniforme do eletrólito do interior do furo. A Figura 37 apresenta uma imagem superior de um furo realizado sob estes parâmetros com uma circunferência para avaliação da circularidade do furo. A pequena profundidade dos furos, devido a dificuldade de usinagem, não é adequada para a utilização destes para a análise de tensões residuais pelo método do furo cego.



**FIGURA 37** – Foto superior de furo realizado sob os parâmetros: velocidade de avanço da ferramenta de 0,56 mm/min, tensão de 5V e concentração de eletrólito de 10% de NaCl.

**b – Tensão aplicada 10 V**

Com a tensão de 10 V foi possível usinar os corpos de prova nas três velocidades utilizadas, sendo que, na velocidade mais elevada, 1,13 mm/min, ocorreram dificuldades de usinagem devido a curto-circuitos.

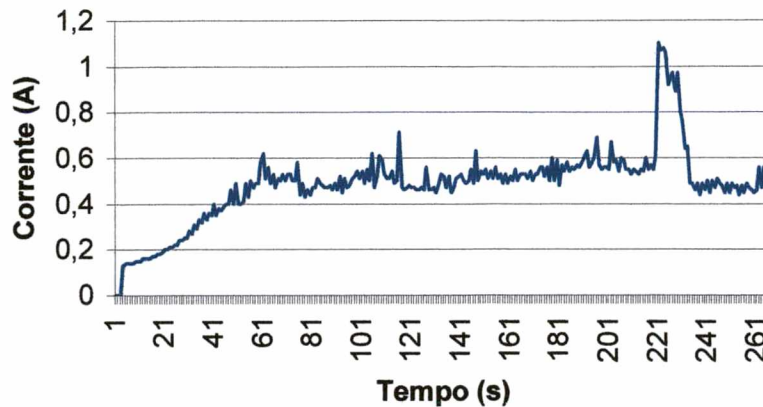
Na velocidade de 0,56 mm/min, a forma geométrica do furo obtido aproxima-se da forma descrita na literatura especializada, com o fundo apresentando forma esférica, conforme observado na Figura 38. A variação do diâmetro na boca do furo situou-se entre 1,46 e 1,52 mm e na linha do arredondamento entre 1,00 e 1,26 mm.

A corrente média da usinagem realizada nestas condições foi de 0,49 A, com um desvio médio de 0,091 e o desvio padrão de 0,132. O gráfico característico da variação da corrente de usinagem pelo tempo para estas condições de usinagem é semelhante ao obtido quando da usinagem do furo da Figura 38 apresentado na Figura 39.



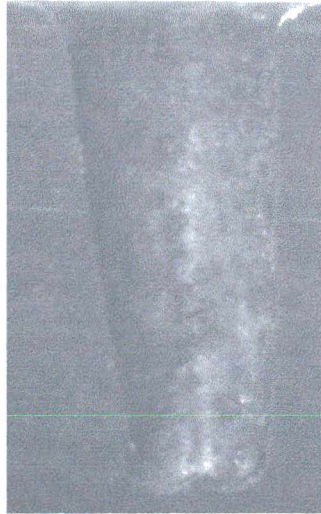
**FIGURA 38** – Forma geométrica característica de furo obtido por usinagem eletroquímica obtida com as seguintes condições: velocidade de avanço da ferramenta 0,56 mm/min, tensão aplicada 10 V e concentração do eletrólito de 10% de NaCl



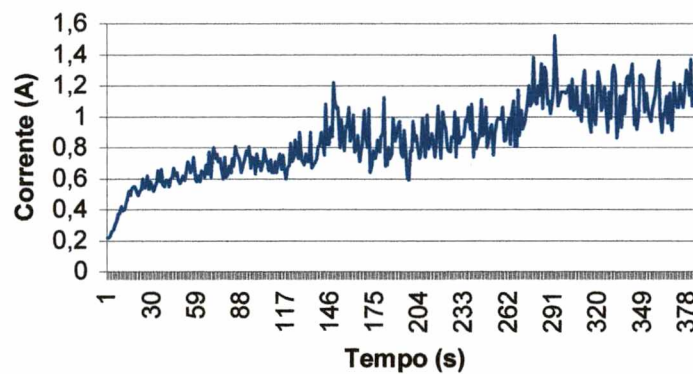


**FIGURA 39** – Gráfico da variação da corrente com o tempo de usinagem do furo apresentado na Figura 38.

Com a elevação da velocidade de avanço da ferramenta para 0,78 mm/min a forma geométrica característica de furos obtidos por usinagem eletroquímica foi perdida com o fundo dos furos apresentando os cantos arredondados com a parte central mostrando-se plana com uma elevação central conhecida como 'nib' o que se observa na Figura 40. A corrente média obtida nas condições utilizadas na Figura 40 foi de 0,81 A com desvio médio de 0,164 e com desvio padrão de 0,214. O gráfico característico da variação da corrente com o tempo de usinagem para as condições da Figura 40 pode ser observado na Figura 41 onde está apresentado o gráfico para o furo da Figura 40.



**FIGURA 40** – Furo com formato característico obtido nas condições de velocidade de avanço da ferramenta 0,78 mm/min, tensão 10 V e concentração do eletrólito igual a 10 % de NaCl



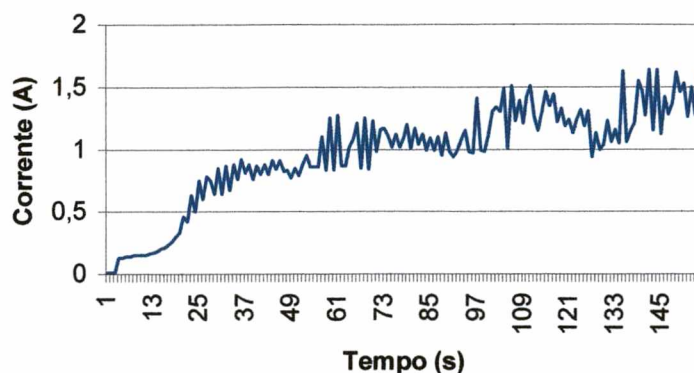
**FIGURA 41** – Gráfico da variação da corrente de usinagem com o tempo do furo apresentado na Figura 40

Com o aumento da velocidade de avanço da ferramenta para 1,13 mm/min, ocorreu um incremento nas dificuldades durante a usinagem o que ocasionou a perda de alguns ensaios devido a ocorrência de curto-circuitos durante a usinagem. Os ensaios que lograram êxito apresentaram o fundo com 'nib' central com os cantos

arredondados. O diâmetro da boca do furo variou entre 1,56 a 1,81 mm e na linha do arredondamento dos cantos entre 1,30 a 1,54 mm, a corrente média de usinagem obtida foi de 0,75 A com desvio médio de 0,334 e com desvio padrão de 0,392. A Figura 42 mostra um furo obtido nas condições de usinagem acima descritas, com 1,13 mm/min para a velocidade de avanço da ferramenta, 10 V para a tensão aplicada e com uma concentração de NaCl no eletrólito de 10% m/V. A Figura 43 apresenta o gráfico da variação da corrente de usinagem com o tempo durante o ensaio do furo apresentado na Figura 42. O formato do gráfico é semelhante em todos os ensaios realizados nestas condições de usinagem.

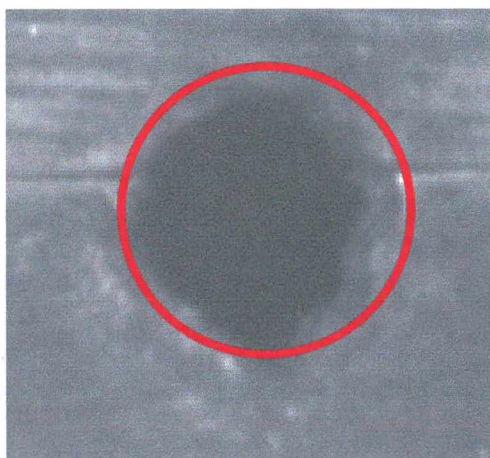


**FIGURA 42** – Furo obtido sob as seguintes condições de usinagem , velocidade de avanço da ferramenta 1,13 mm/min, tensão aplicada 10 V e concentração de NaCl no eletrólito de 10 % m/V



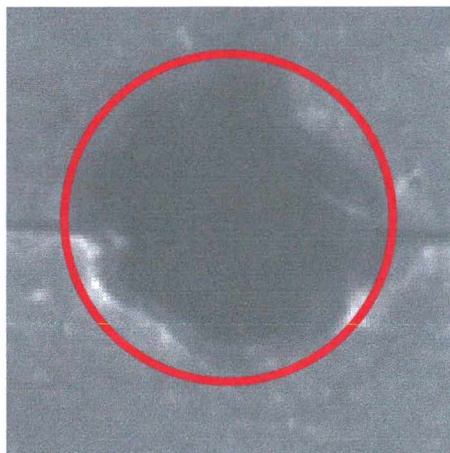
**FIGURA 43** – Gráfico da variação da corrente de usinagem com o tempo nas condições da Figura 42.

A análise da circularidade, com a utilização da tensão de 10V e 10% m/V de concentração de NaCl nas três velocidades utilizadas apresentou os melhores resultados na velocidade de 1,13 mm/min. Nas velocidades de 0,56 e 0,78 mm/min, a circularidade ficou bastante prejudicada, com a boca do furo se apresentando bastante irregular devido a saída preferencial do eletrólito, como pode ser observado nas Figuras 44, 45 e 46 respectivamente.

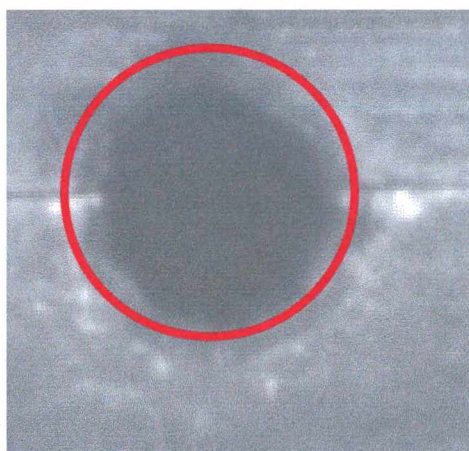


**FIGURA 44** - Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 0,56 mm/min, tensão de 10V e concentração de eletrólito de 10% m/V (onde se nota saída preferencial de eletrólito)





**FIGURA 45** - Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 0,78 mm/min, tensão de 10V e concentração de eletrólito de 10% m/V, pode-se verificar vários pontos de saída preferencial de eletrólito prejudicando a circularidade.



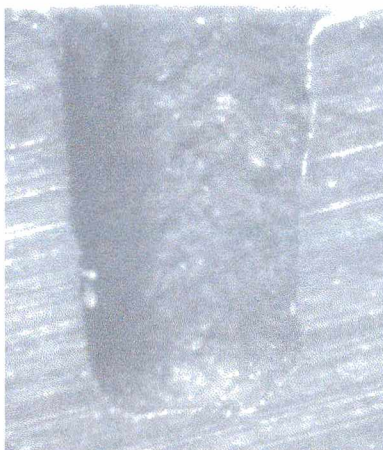
**FIGURA 46** - Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 1,13 mm/min, tensão de 10V e concentração de eletrólito de 10% m/V, nota-se uma saída mais homogênea do eletrólito, apresentando uma circularidade melhor que os anteriores.



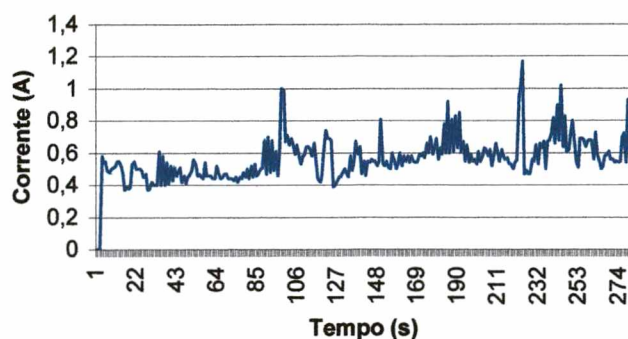
### c – Tensão aplicada 15 V

Quando aplicada uma tensão de 15 V foi possível a usinagem nas três velocidades utilizadas nos ensaios, sendo a de melhores resultados a velocidade de 0,78 mm/min.

Com a velocidade de 0,56 mm/min os furos obtidos apresentaram forma cônica com fundo plano apresentando os cantos arredondados. A corrente média de usinagem ficou em 0,56 A com desvio médio em 0,093 e com desvio padrão em 0,135. A Figura 47 apresenta um furo obtido nas condições de usinagem acima descritas e a Figura 48 apresenta um gráfico da variação da corrente pelo tempo de usinagem característico para as condições acima descritas.

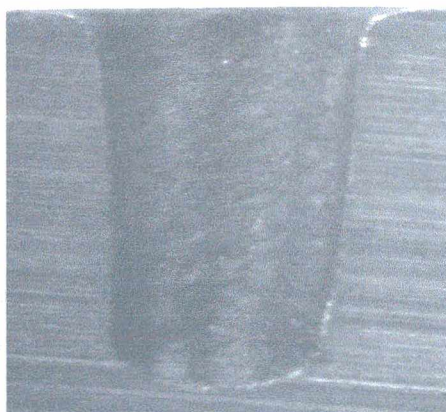


**FIGURA 47** – Furo obtido com velocidade de avanço da ferramenta em 0,56 mm/min, com uma tensão aplicada de 15 V e eletrólito com 10% m/V de concentração de NaCl

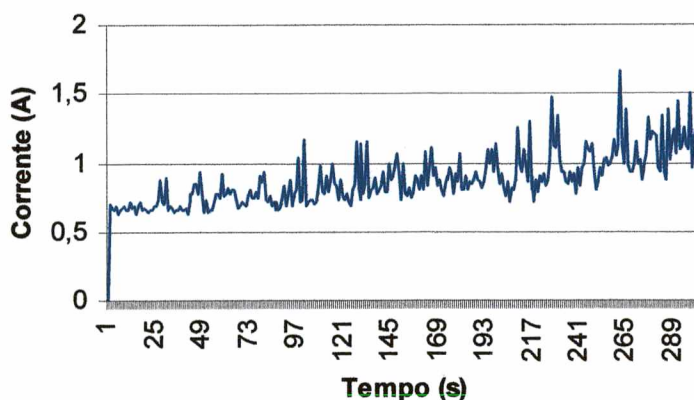


**FIGURA 48** – Gráfico da variação da corrente de usinagem pelo tempo para o furo da Figura 47.

Quando a velocidade empregada foi de 0,78 mm/min, os furos obtidos apresentaram a forma característica dos furos realizados através de usinagem eletroquímica, forma de sino invertido com fundo esférico. A corrente de usinagem foi de 0,88 A com um desvio médio de 0,150 e um desvio padrão de 0,195. A Figura 48 apresenta um furo típico usinado nestas condições, e a Figura 49 apresenta o seu gráfico da variação da corrente com o tempo de usinagem, que apresenta um formato característico do comportamento da corrente de usinagem sob estas condições de trabalho.



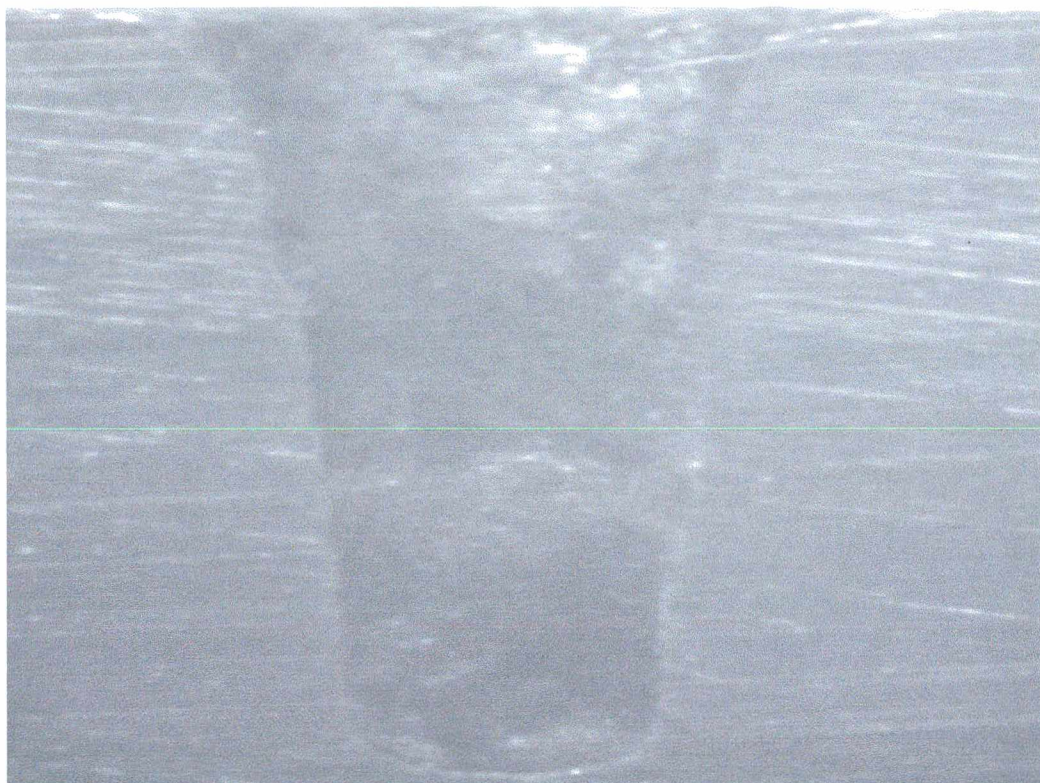
**Figura 48** – Furo obtido nas condições de velocidade e avanço da ferramenta em 0,78 mm/min, com uma tensão aplicada de 15 V e concentração do eletrólito de 10% m/V de NaCl. (onde é clara a forma característica da furação eletroquímica)



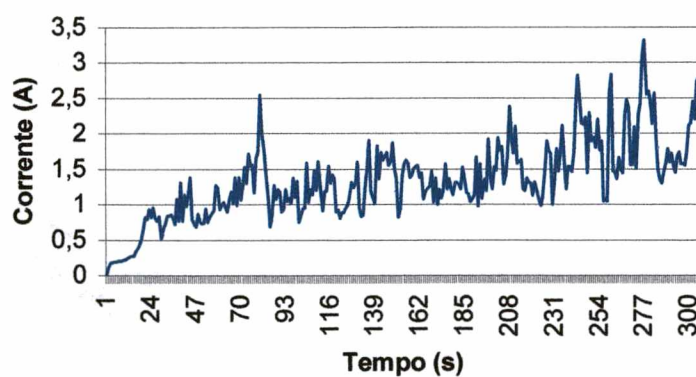
**Figura 49** – Gráfico característico da variação da corrente com o tempo de usinagem para as condições da Figura 48.

Quando a velocidade da ferramenta foi de 1,13 mm/min a forma geométrica do furo manteve-se semelhante a anterior, mas as paredes laterais apresentam maiores irregularidades como pode ser observado na Figura 50. A corrente média de usinagem foi de 1,33 A, com um desvio médio de 0,440 e um desvio padrão de 0,325. Valores elevados dos desvios indicam existir uma grande flutuação no valor da corrente de usinagem o que pode ser comprovado através do gráfico. Esta variação existe devido a problemas no avanço da ferramenta (motor de passo = velocidade não contínua) e a problemas de fluxo de eletrólito durante a usinagem. O diâmetro da boca do furo é de cerca de 1,94 mm e o diâmetro interno de cerca de 1,29 mm. A Figura 50 apresenta um furo característico destas condições de usinagem e a Figura 51 apresenta o gráfico característico da variação da corrente de usinagem com o tempo para estas condições.



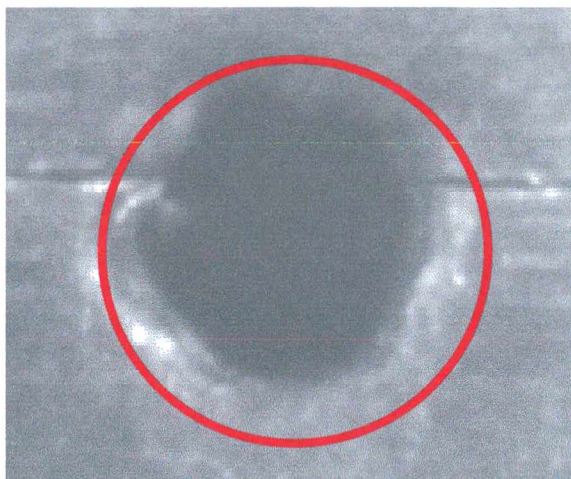


**Figura 50** – Furo característico obtido nas condições de velocidade de avanço da ferramenta em 1,13 mm/min, com uma tensão aplicada de 15 V e concentração do eletrólito de 10% m/V de NaCl.

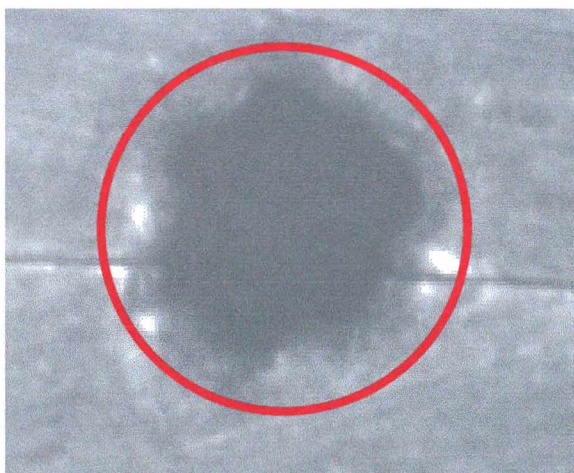


**FIGURA 51** – Gráfico característico da variação da corrente de usinagem em relação ao tempo de usinagem nas condições de usinagem da Figura 50

A circularidade para estes parâmetros apresentou saídas preferenciais de eletrólito, sendo os melhores resultados obtidos nas velocidades de 0,56 e 1,13 mm/min, conforme observa-se nas Figuras 52, 53 e 54 respectivamente.

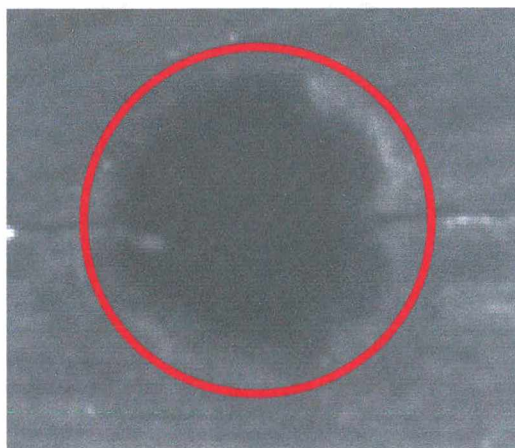


**FIGURA 52** - Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 1,13 mm/min, com uma tensão aplicada de 15V e concentração de eletrólito de 10% m/V (nota-se a existência de saídas preferenciais de eletrólito)



**FIGURA 53** - Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 0,78 mm/min, com uma tensão aplicada de 15V e concentração de eletrólito de 10% m/V (nota-se a extrema irregularidade causada por várias saídas preferenciais de eletrólito)





**FIGURA 54** - Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 0,56 mm/min, com uma tensão aplicada de 15V e concentração de eletrólito de 10% m/V (nota-se a existência de saída preferencial de eletrólito)

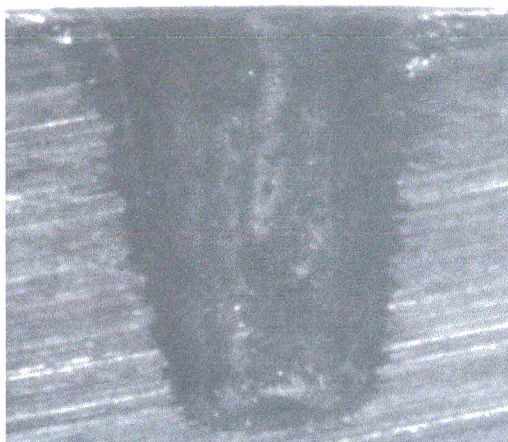
#### 7.8.2 Eletrólito com concentração 15 % m/V de NaCl

##### a – Tensão aplicada 5 V

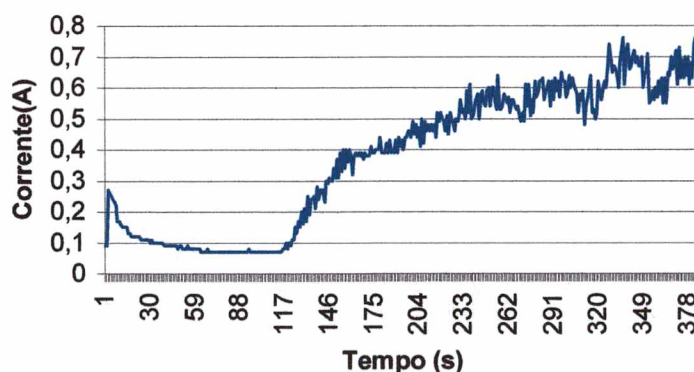
Com a concentração do eletrólito de 15 % e tensão aplicada de 5 V foram obtidos bons resultados na usinagem, com a velocidade de avanço de 0,56 mm/min, a mais lenta das utilizadas. Nas outras velocidades, 0,78 e 1,13 mm/min, ocorriam curto-circuitos logo após o início da usinagem, inviabilizando o prosseguimento da mesma.

Na velocidade de 0,56 mm/min os ensaios apresentaram furos com o formato de sino invertido, com fundo esférico e diâmetros variando de 1,50 a 2,00 mm. A corrente média obtida na usinagem foi de 0,41 A, com desvio médio de 0,158 e um desvio padrão de 0,184. Pelos valores dos desvios, nota-se que não houve uma

grande variação nos valores da corrente durante o processo de usinagem. As Figuras 55 e 56 apresentam um furo típico usinado nestas condições e o gráfico da variação da corrente de usinagem com o tempo de usinagem que possui o formato típico obtido nestas condições de usinagem que são as utilizadas no furo da Figura 55.

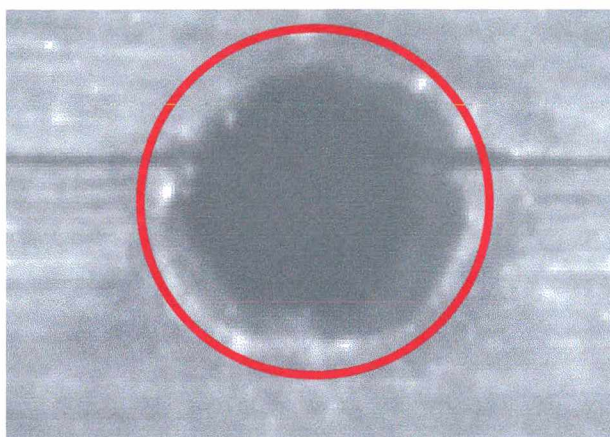


**FIGURA 55** – Furo característico obtido nas condições de usinagem com concentração do eletrólito de 15 % m/V de NaCl, velocidade de avanço da ferramenta de 0,56 mm/min e com uma tensão aplicada de 5 V.

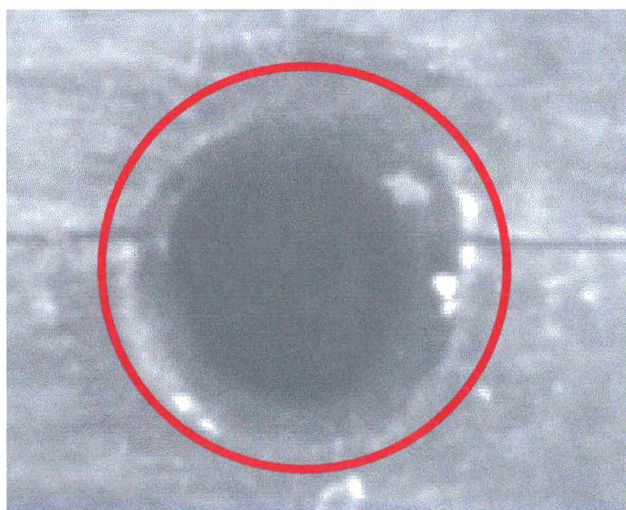


**FIGURA 56** – Gráfico característico da variação da corrente com o tempo durante a usinagem nas condições de trabalho da Figura 55.

Com concentração do eletrólito de 15% m/V e com uma tensão aplicada de 5V a única velocidade em que a usinagem foi possível foi de 0,56 mm/min. Nestas condições os furos apresentaram uma circularidade boa sem a existência de saídas preferenciais de eletrólito marcantes como pode se observar nas Figuras 57 e 58.



**FIGURA 57** - Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 0,56 mm/min, tensão de 5V e concentração de eletrólito de 15% m/V. (notar a melhor circularidade)



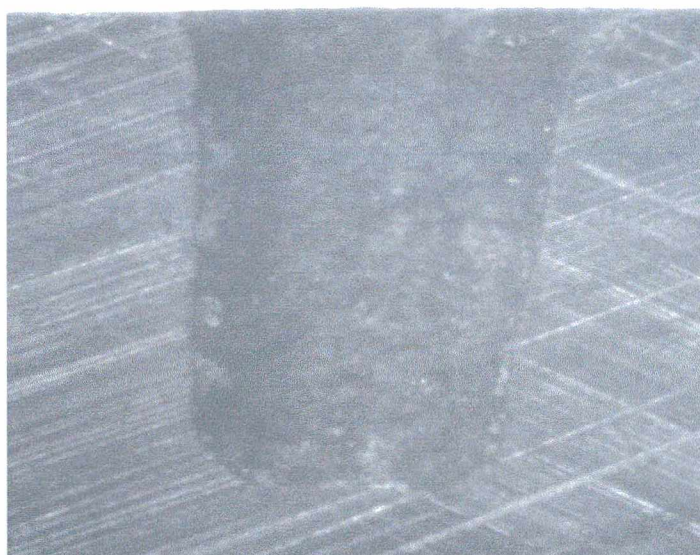
**FIGURA 58** - Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 0,56 mm/min, com uma tensão aplicada de 5V e concentração de eletrólito de 15% m/V em NaCl. (notar a melhor circularidade)



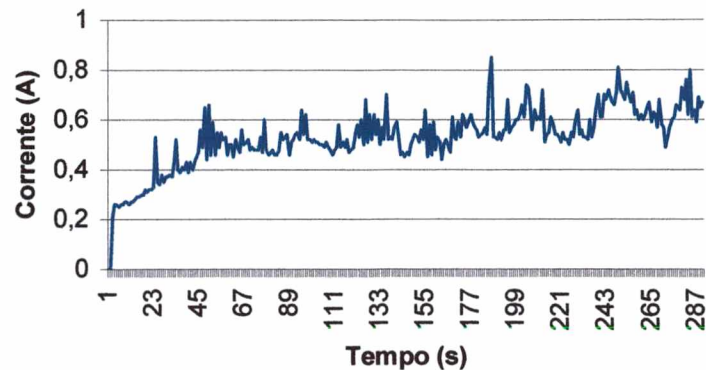
**b – Tensão aplicada 10 V**

Com a aplicação de uma tensão de 10 V a usinagem foi possível em todas as velocidades ensaiadas, apresentando resultados próximos em termos da forma geométrica obtida.

Na velocidade de 0,56 mm/min os furos realizados apresentaram o fundo plano com cantos arredondados, apresentando em alguns casos 'nib'. As paredes laterais apresentavam inclinação no formato de um cone com a ponta seccionada, conforme pode-se observar na Figura 59. A corrente média obtida durante as usinagens foi de 0,51 A, com um desvio médio de 0,105 e um desvio padrão de 0,114. O gráfico característico da variação da corrente durante a usinagem com estas condições (10 V, 15 % m/V de NaCl e 0,56 mm/min), é apresentado na Figura 60.

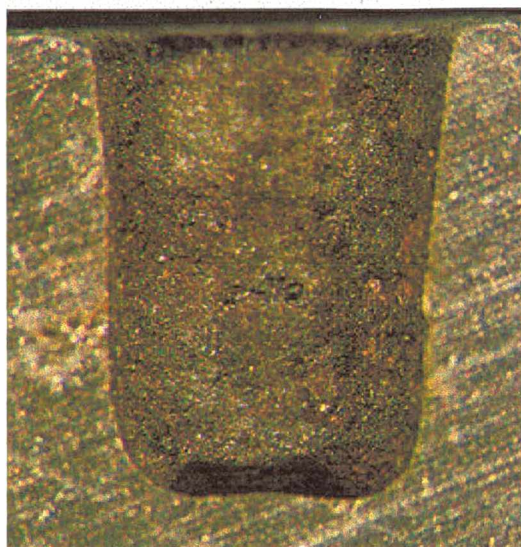


**FIGURA 59** – Furo obtido com as seguintes condições de usinagem: velocidade de avanço da ferramenta de 0,56 mm/min, tensão aplicada de 10 V e concentração de NaCl de 15 % m/V

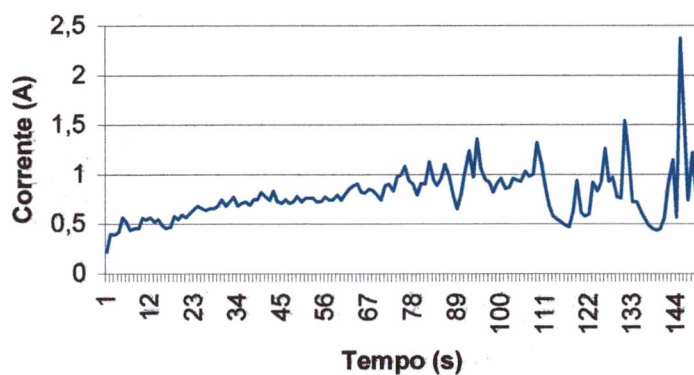


**FIGURA 60** – Gráfico característico da variação da corrente durante o tempo de usinagem para os parâmetros de usinagem do furo apresentado na Figura 59.

Com a aplicação da velocidade de avanço de 0,78 mm/min os furos obtidos apresentaram-se com uma melhor qualidade de forma geométrica, com menor inclinação das paredes laterais, sem a existência de 'nib' e com fundo plano com os cantos arredondados. A corrente média de usinagem ficou em torno de 0,61 A, com um desvio médio de 0,186 e um desvio padrão de 0,240. As Figuras 61 e 62 apresentam respectivamente um furo usinado e o gráfico característico da corrente pelo tempo na usinagem realizada com as seguintes condições de trabalho, concentração do eletrólito de 15 % m/V de NaCl, tensão de 10 V e velocidade de avanço da ferramenta de 0,78 mm/min.



**FIGURA 61** – Foto de um furo obtido com os seguintes parâmetros de usinagem: concentração de eletrólito 15 % m/V de NaCl, 10 V de tensão aplicada e 0,78 mm/min de velocidade de avanço da ferramenta.



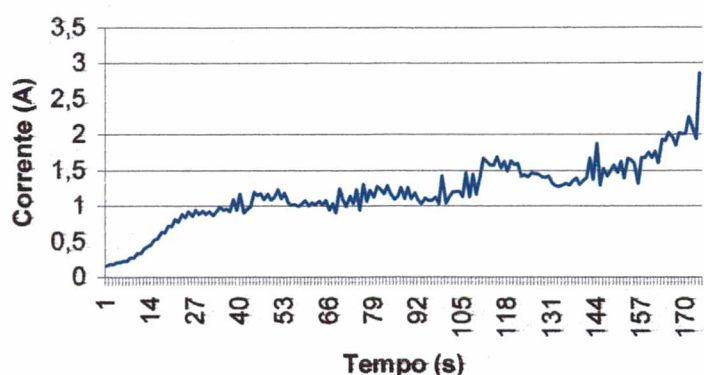
**FIGURA 62** – Gráfico da variação da corrente de usinagem com o tempo para furo apresentado na Figura 61, que apresenta o formato característico para condições de usinagem semelhantes.



Com a aplicação da velocidade de 1,13 mm/min mantendo-se os outros parâmetros constantes, observou-se uma dificuldade na usinagem, com a ocorrência de curto-circuitos em alguns ensaios. Nos ensaios realizados sem a ocorrência de curto-circuito, obteve-se um furo com uma forma geométrica de fundo plano tendo cantos arredondados e as paredes laterais inclinadas. A corrente média de usinagem situou-se na casa de 1,00 A, com um desvio médio de 0,320 e um desvio padrão de 0,390, apresentando um comportamento bem instável como pode-se notar dos valores elevados dos desvios. A Figura 63 apresenta um furo obtido com estas condições de usinagem e a Figura 64 apresenta o gráfico característico da variação da corrente com o tempo de usinagem para estes parâmetros de usinagem.

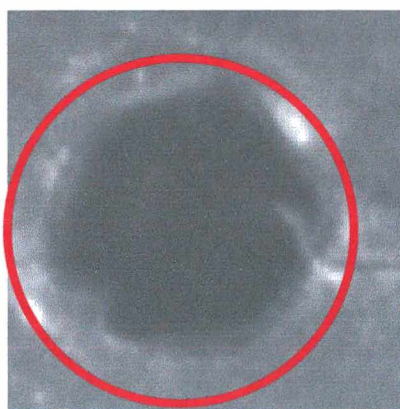


**FIGURA 63** – Furo obtido com os seguintes parâmetros de usinagem: 15 % m/V concentração de NaCl no eletrólito, 10 V tensão aplicada e 1,13 mm/min velocidade de avanço da ferramenta

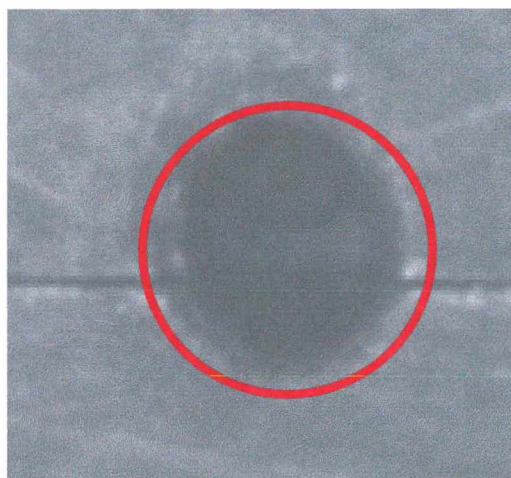


**FIGURA 64** – Gráfico característico da variação da corrente com tempo de usinagem para as condições do furo apresentado na Figura 63.

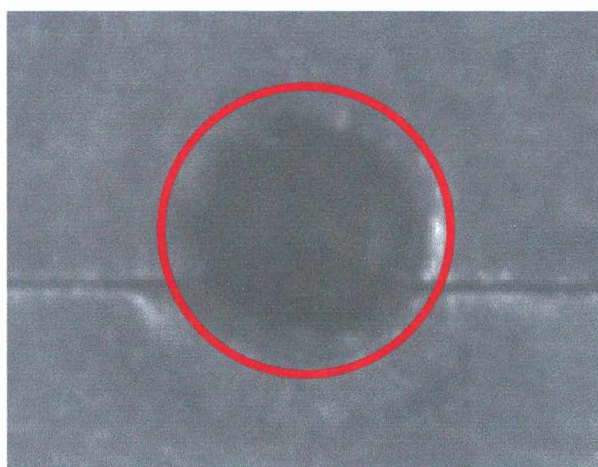
A circularidade nas condições de usinagem com tensão igual a 10 V e concentração de eletrólito de 15% m/V de NaCl, apresentou bons resultados na velocidades de 0,78 mm/min. Nas velocidades de 0,56 e 1,13 mm/min, apresentaram, respectivamente, uma ovalização acentuada e saídas preferenciais de eletrólito, conforme pode ser observado nas Figuras 65, 66 e 67 respectivamente.



**FIGURA 65** - Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 1,13 mm/min, tensão aplicada de 10v e concentração de eletrólito de 15% m/V de NaCl.  
(nota-se a existência de saídas preferenciais de eletrólito)



**FIGURA 66** - Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 0,56 mm/min, tensão aplicada de 10v e concentração do eletrólito de 15% m/V de NaCl.  
(notar a ovalização da boca do furo)



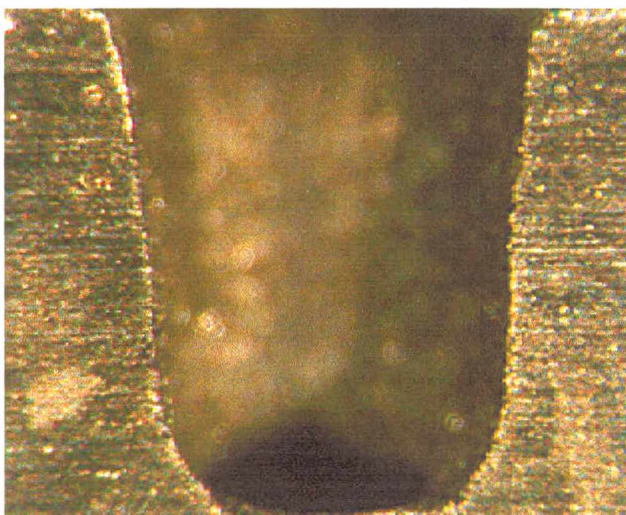
**FIGURA 67** - Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 0,78 mm/min, tensão de 10V e concentração de eletrólito de 15% m/V de NaCl. (apresenta boa circularidade)



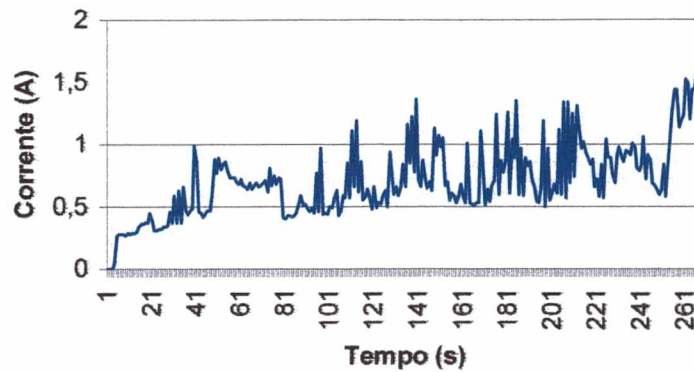
### C – Tensão aplicada 15 V

Com a tensão aplicada de 15 V e a concentração do eletrólito em 15 % m/V de NaCl, a usinagem ocorreu sem a incidência de curto-circuitos, propiciando assim melhores resultados em todas as velocidades de avanço da ferramenta utilizadas (0,56, 0,78 e 1,13 mm/min).

Na velocidade de avanço da ferramenta de 0,56 mm/min, obteve-se furos com a forma geométrica característica de usinagens eletroquímicas, com a forma de sino invertido, ou seja, apresentando o fundo com características esféricas, conforme pode ser observado na Figura 68, atingindo, durante a usinagem, a corrente média de 0,65 A com um desvio médio de 0,193 e um desvio padrão de 0,262.



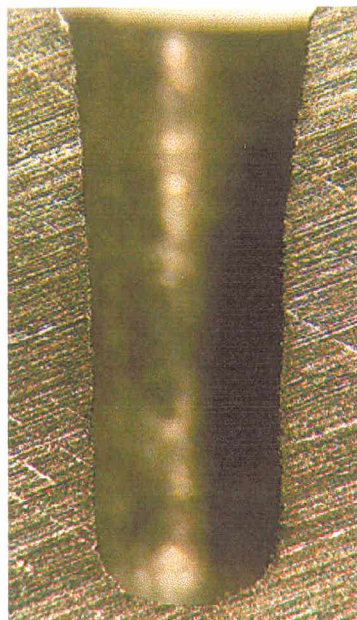
**FIGURA 68** – Furo obtido com concentração do eletrólito igual a 15 % m/V de NaCl, velocidade de avanço da ferramenta de 0,56 mm/min e tensão aplicada de 15 V.



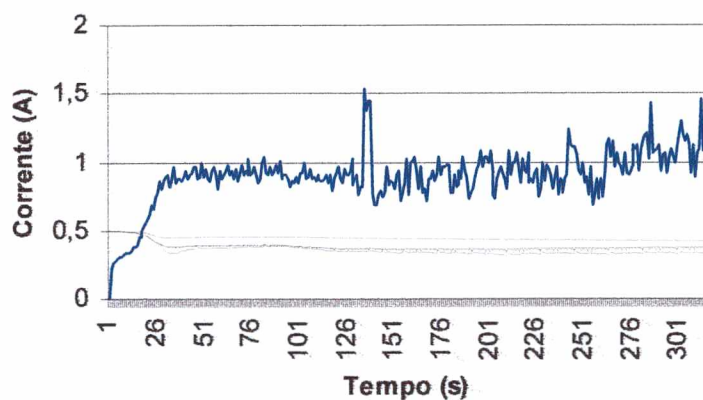
**FIGURA 69** – Gráfico característico da variação da corrente de usinagem com o tempo para as condições de usinagem da Figura 68.

Na velocidade de 0,78 mm/min, continua a existir uma usinagem sem a ocorrência de curto-circuitos com uma elevação da corrente média de usinagem para 0,91 A, com um desvio médio de 0,121 e um desvio padrão de 0,178, a forma geométrica obtida na usinagem é a de um sino invertido com o fundo apresentando característica esférica como observado na Figura 70. O gráfico característico da variação da corrente com o tempo pode ser observado na Figura 71.





**FIGURA 70** – Forma de furo obtido com condições de usinagem iguais à 15 % m/V de concentração de eletrólito (NaCl), 15 v de tensão aplicada e velocidade de avanço da ferramenta de 0,78 mm/min.

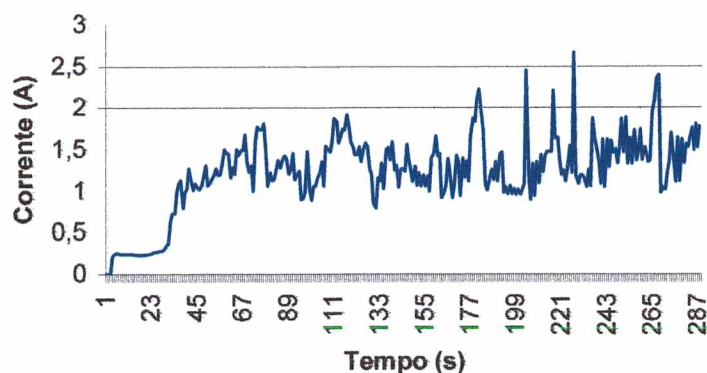


**FIGURA 71** – Gráfico característico dos furos obtidos com as condições de usinagem da Figura 70.

A uma velocidade de avanço da ferramenta de 1,13 mm/min, a usinagem continua ocorrendo sem curto-circuitos. mas a corrente de usinagem sofre uma maior oscilação e a forma geométrica obtida dos furos continua sendo a de um sino invertido, com fundo de características esféricas com as paredes laterais apresentando grandes irregularidades. Estas características estão apresentadas na Figura 72 e no gráfico característico da variação da corrente com o tempo na Figura 73.

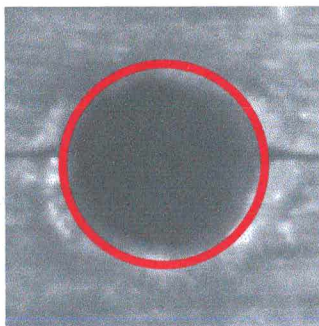


**FIGURA 72** – Furo característico obtido com as seguintes condições de usinagem: tensão aplicada 15 V, concentração do eletrólito 15 % de NaCl e velocidade de avanço da ferramenta de 1,13 mm/min.



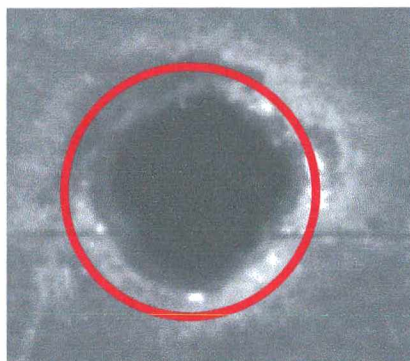
**FIGURA 73** – Gráfico característico da variação da corrente de usinagem pelo tempo para as condições de usinagem apresentadas na Figura 72.

A circularidade nas condições de usinagem com tensão igual a 15V e concentração de eletrólito de 15% m/V de NaCl apresentou bons resultados na velocidades de 0,56 mm/min, na velocidade de 0,78 mm/min apresentou saídas preferenciais de eletrólito enquanto que na velocidade de 1,13 mm/min apresentou resultados de circularidade regulares sendo que , em alguns ensaios, apresentou saída preferencial de eletrólito não muito acentuada, conforme pode ser observado nas Figuras 74, 75 e 76, respectivamente.

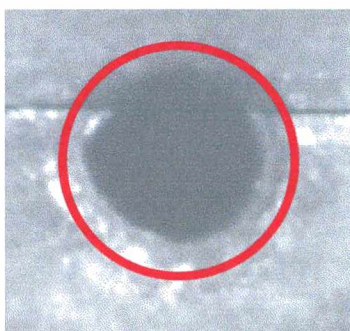


**FIGURA 74** - Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 0,56 mm/min, tensão aplicada de 15V e concentração de eletrólito de 15% m/V de NaCl, (notar a boa circularidade





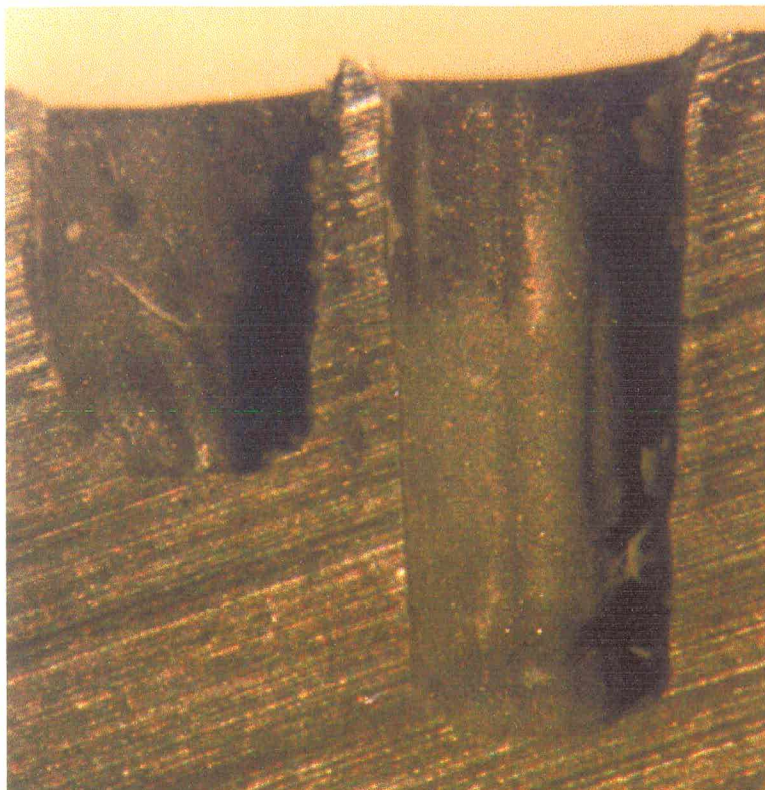
**FIGURA 75** - Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 0,78 mm/min, tensão aplicada de 15V e concentração de eletrólito de 15% m/V de NaCl, (notar as saídas preferenciais do eletrólito).



**FIGURA 76** - Foto superior de furo realizado com velocidade de avanço de 1,13 mm/min, tensão aplicada de 15V e concentração de eletrólito de 15% m/V de NaCl (notar a circularidade, neste caso boa, apesar de leve saída preferencial a esquerda).

### 7.8.3 Ensaaios realizados com $\text{NaNO}_3$

Foram realizados ensaios com eletrólito a base de  $\text{NaNO}_3$  para comparação com os ensaios realizados com o eletrólito a base de  $\text{NaCl}$ . Estes ensaios foram realizados ao final dos experimentos, quando o protótipo desenvolvido já se apresentava com problemas no sistema de avanço e de aquisição de dados (corrente de usinagem). Desta forma, estes ensaios foram realizados sem a adequada aquisição dos dados referentes a corrente de usinagem, não sendo possível apresentar o gráfico da variação da corrente de usinagem pelo tempo e o avanço da ferramenta teve de ser realizado somente à velocidade de 0,78 mm/min, impedindo uma comparação direta com os ensaios com eletrólito a base de  $\text{NaCl}$ , resultando em uma comparação qualitativa. Além dos problemas técnicos, outra dificuldade encontrada foi a pequena quantidade de  $\text{NaNO}_3$  disponível para os ensaios que não permitia um número adequado de ensaios para uma comparação precisa entre os eletrólitos. A Figura 77 apresenta dois furos usinados com eletrólito a base de  $\text{NaNO}_3$ . Apesar de não se poder comparar diretamente os ensaios é possível verificar que os furos usinados com o eletrólito a base de  $\text{NaNO}_3$  apresentaram, visualmente, uma forma geométrica mais precisa, com o formato mais adequado à utilização para usinagem de furos destinados à análise de tensões residuais, não apresentando a forma de sino invertido, mas com o fundo levemente esférico e sem ocorrência de 'nib'.



**FIGURA 77** – Furos realizados com eletrólito a base de  $\text{NaNO}_3$

## **CAPÍTULO 8**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVOS TRABALHOS**

#### **8.1 CONCLUSÕES**

O trabalho realizado permitiu que se observasse que a obtenção de furos visando a medição de tensões residuais pelo método do furo cego pelo processo de usinagem eletroquímica é perfeitamente possível, bem como a obtenção de outras formas pelo processo de usinagem eletroquímica.

Através dos resultados dos ensaios pode-se perceber que ainda não se obteve a forma geométrica perfeitamente adequada à medição de tensões residuais pelo método do furo cego. Mas, mesmo assim, observa-se que existe a possibilidade de se obter esta forma geométrica através do processo de usinagem eletroquímica e do estudo do processo e conseqüente adequação dos parâmetros de usinagem.

O protótipo desenvolvido durante o trabalho, apesar de sua simplicidade, cumpriu o papel determinado, que foi o de demonstrar a viabilidade de obtenção de furos para medição de tensões residuais pelo método do furo cego através da usinagem eletroquímica, usufruindo assim, de uma das características deste processo que é a de não acrescentar novas tensões à peça durante a usinagem.

O sucesso obtido com os testes do protótipo vem comprovar a possibilidade de utilização do processo de usinagem eletroquímica na obtenção de furos para a medição de tensões residuais pelo método do furo cego. Esta possibilidade justifica o

desenvolvimento de um equipamento de usinagem eletroquímica mais completo que permita um maior controle e variação dos parâmetros de usinagem.

Através da utilização de um material de difícil usinagem pelos meios convencionais de usinagem, fresamento, furação, torneamento, etc., como é o caso do material utilizado (aço rápido 10% Co) comprovou-se que o processo de usinagem eletroquímica é adequado à obtenção de furos em material condutor de eletricidade, não apresentando maior importância as demais propriedades físicas do material.

O equipamento desenvolvido mostrou-se capaz de executar as operações de usinagem necessárias trabalhando com diversos tipos de eletrólito, ferramentas e material de corpo de prova. O equipamento desenvolvido apresentou deficiências na precisão de posicionamento do corpo de prova para os ensaios e a utilização de motor de passo, devido às características de operação deste último fornecer um movimento intermitente, causou um comportamento instável da corrente originada no processo de usinagem, como pode ser verificado através dos gráficos apresentados no capítulo 7 da variação da corrente de usinagem pelo tempo. O movimento de avanço da ferramenta em forma de pulsos proporciona intervalos onde a mesma se comporta como estacionária e intervalos onde se comporta como possuindo um deslocamento constante. Desta maneira, quanto menor for o pulso do motor menores serão os intervalos onde a ferramenta se comportará como estacionária. Este avanço pulsado não mostrou-se adequado à utilização como sistema de avanço da ferramenta. Pois causa aumento a usinagem estacionária prejudicando a precisão de forma do furo obtido.

As demais características do protótipo mostraram comportamento satisfatório dentro de suas limitações de controle e variação de parâmetros.



A seguir são colocadas as conclusões retiradas dos ensaios realizados com o protótipo desenvolvido, em relação às características necessárias de forma geométrica do furo, operação do equipamento e de características do equipamento.

- O sistema de avanço desenvolvido, como já comentado, mostrou-se inadequado, devido ao movimento de avanço obtido ser intermitente. Deve-se optar pela utilização de sistemas de avanço hidráulicos ou baseados no acionamento através de motores de corrente contínua o que irá fornecer um movimento mais suave e contínuo.

- O sistema de alimentação de energia elétrica deveria permitir, além da possibilidade de alimentação por tensão constante, a alimentação por corrente constante com a conseqüente variação da tensão pelo tempo durante o processo de usinagem.

- O sistema de alimentação de eletrólito, revelou-se de baixa durabilidade e precisão de alimentação, não permitindo variações na vazão e na pressão de alimentação de eletrólito.

- O eletrólito utilizado nos ensaios, soluções de NaCl e água pura em duas concentrações em peso, 10% e 15%, revelou-se, como indicado na literatura, extremamente agressivo, proporcionando assim resultados de baixa precisão dimensional e pouca repetibilidade de resultados, como observado na análise e demonstração dos resultados no capítulo 7.

- A utilização de ferramentas sem revestimento revelou-se, em combinação com o eletrólito agressivo, inadequada, proporcionando a possibilidade de existência de usinagens laterais o que levou, em alguns casos, à baixa precisão de resultados relacionados as formas geométricas.

- A utilização de um eletrólito menos agressivo, solução de  $\text{NaNO}_3$  e água pura, em alguns ensaios, proporcionou resultados promissores em relação à precisão, repetibilidade e forma obtida nas usinagens realizadas, apesar da utilização de ferramentas sem revestimento isolante.

- Finalmente observou-se que devido à agressividade das soluções eletrolíticas utilizadas, o equipamento sofreu uma rápida deterioração de suas características, denotando assim a necessidade de uma boa proteção das partes não envolvidas diretamente na usinagem ao ataque do eletrólito. Esta recomendação estende-se ao local onde estiver instalado o equipamento, que deve possuir uma boa circulação de ar e os demais equipamentos ali localizados devem possuir uma proteção contra o possível ataque pela névoa e respingos de eletrólito. Recomenda-se também que o operador do equipamento esteja devidamente protegido através de equipamentos de proteção individual.

- No geral conclui-se que o processo possui grandes possibilidades de adequação à obtenção de furos com características geométricas adequadas à utilização em medição de tensões residuais pelo método do furo cego, bastando um melhor desenvolvimento do equipamento e maior número de ensaios com outras combinações/concentrações de eletrólitos e parâmetros de usinagem.

## 8.2 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A seguir são descritas sugestões de trabalhos que podem ser desenvolvidos para dar continuidade ao desenvolvimento da usinagem eletroquímica como processo para obtenção de furos com a necessária precisão de forma para utilização em

medição de tensões residuais pelo método do furo cego e em outras aplicações diversas.

1. Aperfeiçoamento do protótipo, através da melhoria do equipamento como, por exemplo, o sistema de acionamento da ferramenta através de motor de corrente contínua, fonte de corrente constante e sistema de alimentação de eletrólito com possibilidade de variação da pressão e da vazão do mesmo.
2. Realização de ensaios com eletrólito à base de  $\text{NaNO}_3$  e outras combinações como  $\text{NaCl}/\text{NaNO}_3$ .
3. Realização de ensaios para verificação da influência do pH nos resultados de usinagem.
4. Realização de ensaios para verificação da influência da variação da condutividade elétrica do eletrólito nos resultados de usinagem.
5. Realização de ensaios com ferramentas isoladas para verificação da influência na forma geométrica.
6. Realização de ensaios com a utilização de corrente pulsante, como indicado na literatura, ao invés de contínua, para verificação da influência nos resultados de usinagem.
7. Desenvolvimento de protótipo com capacidade de movimentação da ferramenta em três eixos para usinar diferentes formas geométricas.
8. Verificação da influência na usinagem da orientação do fluxo de eletrólito, pressão de entrada do eletrólito e vazão de eletrólito.
9. Realização de ensaios com eletrólito a base de soluções de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  com a utilização do método STEM.

## CAPÍTULO 9

### BIBLIOGRAFIA

#### 9.1 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 01 RODACOSKI, M R *Medição de Tensões Residuais Localizadas Através do Método do Furo Cego e Holografia Eletrônica ESPI*, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica, UFSC, 1997, 149 p.
- 02 ALBERTAZZI, A G, KANDA, C., BOETTGER, J. *Adequação de um Interferômetro Radial para Medição de Tensões Residuais por Meio de Holografia Eletrônica*, Labmetro, UFSC, 08 p.
- 03 KONING, WILFRIED, *Remoção*, apostila tradução Prof. Walter Weingaertner, vol. 3, UFSC, p 104 - 175
- 04 KÖNIG, W. *Fertigungsverfahren Band 3, Abtragen*, vol. 3, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1989
- 05 WELLER, E. J. *Non-Traditional Machining Processes*, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, 1984, 2ª edição, cap. 3, p. 73 - 118
- 06 BENEDICT, G. F., *Nontraditional Manufacturing Processes*, New York, Marcel Denker, 1987, cap. 9, 10, 11, 12, 13, p. 125 - 188,
- 07 MCGEOUGH, J. A., *Principles of Electrochemical Machining*, Chapman and Hall, London, 1974, 255 p
- 08 DROZDA, THOMAS J. et all *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, vol 1, Machining, SME, Dearborn, 1983, 4ª edição, cap. 14, p. 14-16 - 14-93

- 09 TÖNSHOFF, H. K., EGGER, R., KLOCKE, F., *Environmental and Safety Aspects of Electrophysical and Electrochemical Processes*, Annals of the CIRP, vol. 45/2, 1996, p. 553 - 568
- 10 RUMYANTSEV, E. E DAVYDOV, A., *Electrochemical Machining of Metal*, Mir Publishers, Moscow, 1989, 168 p
- 11 GOMES,ROBERTO GUSTMANN *Obtenção e avaliação da qualidade geométrica dos furos obtidos por remoção eletroquímica para a medição de tensões residuais*, Relatório Interno CERTI, 1996, 13 p.
- 12 WECK, MANFRED, *Handbook of Machine Tools*, vol. 1, John Wiley & Sons,
- 13 MCGEOUGH, J.A. *Advanced Methods of Machining*, Chapman and Hall, London, 1988, cap. 4, p. 55 - 88
- 14 MDC *Machining Data Handbook*, *Machinability Data Center*, Metcut Research Associates Inc., vol 2, Cincinnati, 1980, 3ª edição, cap. 9, p. 9.3 - 9.5, cap. 11, p.11.1 - 11.75, cap. 18, p. 18.39 - 18.136
- 15 AVT, *Burr Free Safely and Surely*, catálogo, 1997?, 7 p.
- 16 RISKO, DONALD G., *Electrochemical Machining*, SME Technical Paper, EE 89-820, 1989, 16 p.
- 17 HARDISTY,H. MILEHAM,A.R. SHIRVANI,H. BRANLEY,A.N. *A finite element simulation of the electrochemical machine process*, Annals of the CIRP, vol. 42/1, 1993, p. 201 - 204
- 18 KHAIRY,A.B.E. MCGEOUGH,J.A. *Die sinking by electroerosion dissolution machining*, Annals of the CIRP, vol. 39/1, 1990, p. 191 - 195 p.
- 19 STEMMER, C E *Ferramentas de Corte I*, Editora da UFSC, Florianópolis, 1992

- 20 MONTGOMERY, D C *Design and Analysis of Experiments*, 2º edição, John Wiley & Sons, New York, 1984, 536 p.

## 9.2 BIBLIOGRAFIA DE APOIO

- 21 RISKO, DONALD G., *Machining of forging dies using electrolytic machining and electro discharge machining*, SME Technical Paper, MF 92-225, 1992, 22 p.
- 22 KÖNIG, W. AND PAHL, D. *Accuracy and optimal working conditions in ECM*, Annals of the CIRP, vol. 18/2, 1970, p. 223 - 230
- 23 RAJURKAR, K.P. SCHNACKER, C.L.. *Monitoring and control of electrochemical machining*, JEIASME, vol. 115, nº 2, 1993, p. 216 - 223
- 24 PELIZER, M. C. *Estudo da Influência do Ferramental na Acuracidade de Forma de Peças de Aço ABNT M2, Obtidas por Usinagem Eletroquímica*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 1997, 78p
- 25 SILVA, E.M. *Contribuição para o desenvolvimento de um protótipo de um equipamento de usinagem eletroquímica*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 1996, 78 p.
- 26 CATION, *Electrolytic Services*, catálogo, 1997?, 4 p
- 27 EXTRUDEHONE, *At the Edge to the Surface by your Side*, catálogo, 1997?, 16 p.
- 28 JAIN, V.K. RAJURKAR, K.P. *An Integrated Approach for Tool Design in ECM*, Precision Engineering, vol 13 nº 2, abril 1991, p. 111 – 124

- 29 CRUZ, C. *Há Inúmeras Maneiras Não-Tradicionais de Usinar Materiais. Conheça Algumas.*, Máquinas e Metais, nº 352, maio 1995, p. 80 - 89
- 30 CRUZ, C. MALAQUIAS, E. POSTAL, M. MARIANI, L.F. *Otimização do Circuito Eletrolítico para Protótipo de Usinagem Eletroquímica*, Anais do IV CEM-NNE, 1996, p. 249 - 254
- 31 CRUZ, C. MALAQUIAS, E. *Aspectos Práticos do Projeto de um Equipamento de Usinagem Eletroquímica*, Anais do COBEM;97, Bauru, 1997, 08 p.
- 32 RAJURKAR, K.P. SCHSACKER, C.L. LINDSAY, R.P. *Some aspects of ECM performance and control*, Annals of the CIRP, vol. 27/1, 1978, p
- 33 CRUZ, C. PELIZER, M.C. *Aspectos Práticos do Projeto do Ferramental na Usinagem Eletroquímica do Aço ao Molibdênio*, Anais do COBEM;97, Bauru, 1997, 08 p.
- 34 DATTA, M. *Anodic Dissolution of Metals at High Rates*, IBM Journal Research Developments, vol 37 nº2, março 1993, p. 207 - 226
- 35 KONIG, W. DEGENHARDT, H. *Electro-Chemical Machining of Heat-Resistant Alloys*, Annals of the CIRP, vol 21/1, 1972, p. 43 - 44
- 36 RAJURKAR, K.P. KOZAK, J. WEI, B. MCGEOUGH, J.A. *Modelling and monitoring interelectrode gap in electrochemical machining*, Annals of the CIRP, vol. 44/1, 1995, p
- 37 KAIN, J. *Usinage Électrochimique*, parte 1, La Machine-Outil Française, nº263, abril 1970, p. 229 - 235
- 38 KAIN, J. *Usinage Électrochimique*, parte 2, La Machine-Outil Française, nº264, maio 1970, p. 149 - 155

- 39 KAIN, J. *Usinage Électrochimique*, parte 3, La Machine-Outil Française, n°265, junho 1970, p. 125 - 131
- 40 OSMAN,H.M. ABDEL-RAHMAN,M. *Integrity of Surfaces Produced by Electrochemical Machining*, Journal of materials Processing technology, vol. 37, 1993, p. 667 - 677
- 41 RISKÓ, D.G. DAVYDOV, A D. *MANUFACTURING Applications and Productivity Limitations of electrochemical machining*, Manufacturing Science and engineering, PED-vol. 64, ASME, 1993, p. 701 - 711
- 42 KÖNIG,W. HUMBS,H.J. *Mathematical model for the calculation of the contour of the anode in electrochemical machining*, Annals of the CIRP, vol. 26/1, 1977, p
- 43 KONIG,W. LINDELAUF,P. *Surface Generation in Electrochemical Machining*, Annals of the CIRP, vol. 27/1, 1978, p. 97 - 100
- 44 JENG,M. DOONG,J. YANG,C. *The Effects of Carbon Content and Microstructure on the Metal Removal Rate in Electrochemical Machining*, Journal of Materials Processing Technology, vol. 38, 1993, p. 527 - 538
- 45 KHAIRY,A B. *A Knowledge-based System for Electrochemical Machining Procedure*, Journal of Materials Processing Technology, vol 58, 1996, p. 121 -130
- 46 HOURNG,L.W. CHANG, C.S. *Numerical simulation of Electrochemical Drilling*, Journal of Applied Electrochemistry, vol 23, 1993, p. 316 - 321
- 47 KOZAK,J. RAJURKAR,K.P. BALKRISHNA,R. *Study of Electrochemical Jet Machining Process*, Transactions of the ASME - Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol 118, 1996, p. 490 – 498



- 48     RUSZAJ, A. ZYBURA-SKRABALAK, M. CHUCHRO, M. NOVAK, A. *The Influence of Process Parameters on Technological Indicators of the Electrochemical Machining Process with a Nonprofiled Electrode*, Manufacturing Science and Engineering, PED-vol 64, ASME, 1993, p. 713 - 718
- 49     JAIN, V.K. PANDEY, P.C. *Corner Reproduction Accuracy in Electro-Chemical Drilling (ECD) of Blind Holes*, Transactions of the ASME - Journal of engineering for Industry, vol 106, 1984, p. 55 - 61
- 50     RISKO, D.G. *Electrolytic Deburring: Deburring and Radiusing in Seconds*, Technical Paper Mr93-131, SME, 1993, 24 p.
- 51     KAWAFUNE, K. MIKOSHIBA, T. NOTO, K. *The Effect of the Working Parameters on the Working Gap during Electrochemical Machining*, Annals of the CIRP, vol 18, 1970, p. 305 - 317
- 52     LEONARD, I. DUFFIELD, A. *Rapid Sheet Metal Production by the Electrochemical Machining Process*, [www.cranfield.ac.uk/aero/rapid/PROCEEDING/leonard.html](http://www.cranfield.ac.uk/aero/rapid/PROCEEDING/leonard.html), 05 p.
- 53     SORKHEL, S.K. BHATTACHARYYA, B. *Parametric control for Optimal Quality of the Workpiece Surface in ECM*, Journal of Materials Processing Technology, vol 40, 1994, p. 271 - 286
- 54     DIETZ, H. GUNTHER, K.G. OTTO, K. *Electrochemical Machining: Calculation of Side Gap with Respect to Hydrogen Evolution*, Annals of the CIRP, vol 23/1, 1974, p. 45 - 46
- 55     RISKO, DONALD G. *A ECD remove rebarbas e gera raios precisos em segundos*, Máquinas e Metais, julho de 1991, nº 306

- 56 DIETZ,H. GUNTHER,K.G. OTTO,K. *Reproduction Accuracy with Electrochemical Machining: Determination of the Side Gap*, Annals of the CIRP, vol 22/1, 1973, p. 61 - 62
- 57 COOK,N.H. FOOTE,G.B. JORDAN,P. KALYANI,B.N. *Experimental Studies in electro-Machining*, Transactions of the ASME - Journal of Engineering for Industry, novembro 1973, p 945 - 950
- 58 LOUTREL,S.P. COOK,N.H. *Sodium Chloride Electrolyte Data at High Temperatures and Pressures*, Transactions of the ASME - Journal of Engineering for Industry, novembro 1973, p. 997 - 1002
- 59 LOUTREL,S.P. COOK,N.H. *A Theoretical Model for High Rate Electrochemical Machining*, Transactions of the ASME - Journal of engineering for Industry, novembro 1973, p. 1003 - 1008
- 60 LOUTREL,S.P. COOK,N.H. *High Rate Electrochemical Machining*, Transactions of the ASME - Journal fo Engineering for Industry, novmebro 1973, p. 992 - 996
- 61 ZHOU,Y. DERBY,J.J. *The Cathode Design Problem in Electrochmical Machining*, Chemical Engineering Science, vol 50 n°17, 1995, p. 2679 - 2689
- 62 ROUSAR,I. RIEDEL,T. *Sparking at Cathode tools During Electrochemical Machining in Flow-Through Cells*, Journal of Applied Electrochemistry, vol 24, 1994, p. 767 - 771
- 63 AMALNIK,M.S. MCGEOUGH,J.A *Intelligent Concurrent Manufacturability Evaluation of Design for Electrochemical Machining*, Journal of Materials Processing Technology, vol 61, 1996, p. 130 – 139

- 
- 64 NOTO,K. OKUDAIRA,H. KAWAFUNE,K. The Working gap in Electro-Chemical Machining Using Sodium Nitrate solution, Annals of the CIRP, vol 22/1, 1973, p. 63 - 64
- 65 ENACHE,S. OPRAN,C. *The mathematical model of the ECM with magnetic field*, Annals of the CIRP, vol. 38/1, 1989, p
- 66 KÖNIG,W. HUMBS,H.J. *Mathematical model for the calculation of the contour of the anode in electrochemical machining*, Annals of the CIRP, vol. 26/1, 1977, p

## CAPÍTULO 10

### ANEXOS

#### 10.1 Características dos Equipamentos Utilizados

##### 10.1.1 MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

BOSCH AXF 24V 0.05W

motor de corrente contínua com engrenagem redutora

Tensão Nominal	24 Vcc
Potência Nominal	0.05 W
Rotação Nominal	1,6 rpm
Torque	30 N.cm
Permanente	
Torque Arranque	110 N.cm
Desmultiplicação	1:1452
Tipo de Serviço	S1
Grau de Proteção	IP50
Peso	0,2 kg
Consumo Nominal	0,04 A
Consumo Máximo	0,11 A

##### 10.1.2 BOMBA DE ALIMENTAÇÃO DE ELETRÓLITO

A bomba foi aproveitada do sistema de lavação do parábrisa de um automóvel Ford Belina. Deste sistema foram aproveitados o reservatório plástico com capacidade de 2litros e a bomba de alimentação, de carcaça metálica e tensão nominal de 12 Vcc com uma vazão de 215 l/h à aproximadamente 2 metros de coluna d'água.

### 10.1.3 FONTE DE ALIMENTAÇÃO

modelo FCC-3005D

Tensão de Saída	0-30 V
Corrente de Saída	0-5 A
Tensão de Alimentação	220 V (rede)
Regulação de linha máxima	10 mV
Regulação de Carga Máxima	100 mV
Ripple Máximo	1 mVRMS
Resposta Temporal	10 ms
Precisão de Leitura	$\pm 0.1 \%$ da leitura $\pm 1$ dígito
Linearidade de leitura	$\pm 0.1 \%$ da leitura $\pm 1$ dígito
Razão de Amostragem	3 vezes/segundo

### 10.1.4 MULTÍMETRO

EXTECH 383273

Taxa de Leitura	2,5 vezes/segundo
Tensão de Alimentação	9 Vcc
Conexão com PC	RS232

Especificações Elétricas  
corrente continua

Faixa	Resolução	Precisão
200 $\mu$ A	0,1 $\mu$ A	1 % + 1
2 mA	1 $\mu$ A	1 % + 1
20 mA	10 $\mu$ A	1 % + 1
200 mA	100 $\mu$ A	1 % + 1
20 A	10 mA	1,2 % + 3

### 10.1.5 EQUIPAMENTO DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Micro Computador

Intel 386/SX40

Memória RAM 04 Mb

Disco Rígido 41 Mb

S/coprocessador matemático

### 10.1.6 SOFTWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O software utilizado na aquisição de dados foi fornecido juntamente com o multímetro e apresentava as seguintes características:

- permite a escolha do intervalo de amostragem desde 0.5 s até aproximadamente 32000 s
- apresenta os valores máximo e mínimo medidos
- permite a plotagem dos dados no próprio software
- armazena os dados da leitura conforme o intervalo de amostragem
- formato de arquivo compatível com o MS EXCEL

10.2 PROCEDIMENTO PARA CÁLCULO DA TRM DO AÇO RÁPIDO 10%CO

10.2.1 Composição Química do Aço Rápido com 105 de Cobalto

Carbono	C	1.30	Tungstênio	W	10.00	Enxofre	S	0.07
Manganês	Mn	0.30	Cromo	Cr	3.75	Ferro	Fe	67.28
Silício	Si	0.30	Cobalto	Co	10.00	Vanádio	Va	3.00
Molibdênio	Mo	4.00						

10.2.2 Tabela auxiliar para cálculo da TRM

Elemento	C	Mn	Si	Va	W	Cr	Co	Mo	S	Fe
Percentagem em peso	1.30	0.30	0.30	3.00	10.00	3.75	10.00	4.00	0.07	67.28
X										
Peso atômico A	12.00	54.94	28.09	50.94	183.85	51.99	58.93	95.94	32.06	55.85
Valência Z	0	3	4	3 / 5	6 / 8	6	2 / 3	6	2	3
Equivalente químico	0	18.30	7.00	12.74	26.26	8.665	23.57	15.99	16.00	18.62
A/Z										
X(A/Z) x 10 <sup>-2</sup>	0	5.49	2.10	38.22	262.6	32.49	235.70	63.96	1.12	1252.75
X/(A/Z)	0	0.016	4.28 x 10 <sup>-2</sup>	0.2335	0.3808	0.4328	0.4243	0.2501	0.0044	3.6133

### 10.2.3 Cálculo da **TRM** pelo Método da Porcentagem em Peso

Utilizando-se a expressão do cálculo da **TRM** pelo método da porcentagem em peso:

$$\left(\frac{A}{Z}\right)_L = \left[ \sum X_i \left( \frac{A_i}{Z_i} \right) \right] = 18.9443$$

Desta maneira a Taxa de Remoção de Material será igual a:

$$\text{TRM} = \frac{A.I}{Z.F}$$

Onde:

$I \rightarrow$  corrente aplicada, neste caso 1 A

$F \rightarrow$  constante de Faraday , 96500

Desta forma a **TRM** será igual à

$$\text{TRM} = 1.96 \times 10^{-4}$$

### 10.2.4 Cálculo da **TRM** pelo método da superposição de cargas:

Utilizando-se a expressão para cálculo da **TRM** pelo método da superposição de cargas teremos:

$$\left(\frac{A}{Z}\right)_L = \frac{100}{\left[ \sum \left( \frac{X_i}{\frac{A_i}{Z_i}} \right) \right]} = 18.5254$$

Deste modo a Taxa de Remoção de Material será igual a:

$$\text{TRM} = \frac{A.I}{Z.F}$$



Desta forma a **TRM** será igual à

$$\text{TRM} = 1.92 \times 10^{-4}$$

Para a determinação do fluxo volumétrico,  $v$ , devemos dividir a **TRM** pela massa específica da liga que no caso do aço rápido com 10% de cobalto é de 7,86 g/cm<sup>3</sup>.

Pelo método da percentagem em peso teremos um fluxo volumétrico igual à:

$$v = \frac{1.96 \times 10^{-4}}{7,86} = 0,0000249 \text{ cm}^3 / \text{sA} \text{ ou } 0,00149 \text{ cm}^3 / \text{min A}$$

E pelo método da superposição de cargas teremos um fluxo volumétrico igual à:

$$v = \frac{1.92 \times 10^{-4}}{7,86} = 0,0000244 \text{ cm}^3 / \text{sA} \text{ ou } 0,00146 \text{ cm}^3 / \text{min A}$$

Destes resultados podemos verificar que os dois métodos apresentam resultados semelhantes não existindo uma diferença significativa entre os valores obtidos.

### 10.3 PLANILHA DE MEDIÇÕES DO SOFTWARE ÂNCORA

## PLANILHA DAS MEDIÇÕES REALIZADAS NO SOFTWARE ÂNCORA

FOTO	CONCENTRAÇÃO DE ELETROLITO %	TENSÃO (V)	VELOCIDADE DE AVANÇO (mm/min)	DIÂMETRO (mm)	DIÂMETRO INFERIOR (mm)	RAIO DA BORDA DIREITA (mm)	RAIO DA BORDA ESQUERDA (mm)	RAIO DE FUNDO DIREITO (mm)	RAIO DE FUNDO ESQUERDO (mm)	ÂNGULO DIREITO (°)	ÂNGULO ESQUERDO (°)	COMPRIMENTO (mm)	ALTURA NIB (mm)	CORRENTE MÉDIA DE USINAGEM (A)	DESVIO MÉDIO DA CORRENTE DE USINAGEM	DESVIO PADRÃO DA CORRENTE DE USINAGEM
CORPO31F2	15	15	0,56	2,67	1,9159	0,2927	0,2927	0,6115	0,6318	9,54	-	3,6687	0,3200	0,80	0,285	0,348
CORPO31F4	10	5	0,56	1,34	0,9148	0,2572	0,2572	0,2384	0,2384	8,87	-	0,9921	-	0,37	0,173	0,143
CORPO31F6	10	15	0,78	1,87	1,0883	0,2594	0,2594	0,5442	0,5442	1,89	1,38	2,6965	-	0,85	0,217	0,159
CORPO31F7	15	15	0,78	1,58	1,0769	0,2517	0,2517	0,5384	0,5384	0,69	4,29	2,6966	-	0,89	0,202	0,128
CORPO33F1	15	15	1,13	1,82	1,4727	0,2268	0,2268	0,7384	0,7384	-	-	1,8655	-	1,64	0,637	0,109
CORPO33F4	10	10	0,56	1,50	1,0125	0,1909	0,1909	0,4031	0,4031	5,99	-	2,1213	-	0,48	0,147	0,109
CORPO33F5	10	10	0,78	2,06	1,5676	0,2204	0,1865	0,3216	0,3216	4,80	-	3,4367	0,3216	0,76	0,159	0,131
CORPO33F6	10	10	1,13	1,56	1,3064	0,1904	0,1904	0,3381	0,3381	4,46	-	1,1166	0,2613	0,53	0,389	0,365
CORPO33F7	15	10	1,13	1,55	1,3014	0,1760	0,1806	0,2466	0,3583	7,35	-	0,9186	0,3509	0,77	0,372	0,311
CORPO33F8	15	10	0,78	1,55	1,2823	0,2583	0,3940	0,5848	0,5848	-	4,97	1,9868	-	0,59	0,234	0,187
CORPO33F9	15	10	0,78	1,56	1,3898	0,2933	0,3058	0,5247	0,6453	-	-	1,9429	-	0,53	0,209	0,163
CORPO33F10	15	10	0,56	1,53	1,3075	0,2822	0,2822	0,4521	0,4521	-	3,26	1,7665	0,1530	0,50	0,168	0,126
CORPO41F1	15	5	0,56	1,55	1,3046	0,3713	0,3772	0,3035	0,3035	4,53	12,68	0,9946	-	0,29	0,202	0,182
CORPO41F2	15	15	0,56	1,65	1,2510	0,2053	0,2645	0,4961	0,5392	2,41	4,83	2,0059	-	0,71	0,291	0,226
CORPO41F3	15	5	0,56	2,06	1,4747	0,2575	0,4030	0,3953	0,3953	2,41	5,65	2,8430	0,2357	0,50	0,178	0,140
CORPO41F4	10	5	0,56	1,65	1,4076	0,2572	0,3576	0,3363	0,3206	6,50	6,67	1,0166	0,2972	0,31	0,156	0,136
CORPO41F6	10	15	0,78	1,75	1,3447	0,3280	0,3280	0,6724	0,6724	4,46	1,03	3,8957	-	0,87	0,198	0,149
CORPO41F7	15	15	0,78	1,52	1,2557	0,3582	0,3582	0,6278	0,6278	4,46	2,23	4,0313	-	0,90	0,139	0,086
CORPO43F1	15	15	1,13	1,95	1,0986	0,6388	0,6388	0,5493	0,3639	2,58	5,14	5,9599	-	1,23	0,458	0,332
CORPO43F2	10	15	1,13	1,94	1,2864	0,3682	0,4822	0,3839	0,3839	1,89	3,78	3,9630	0,1971	1,34	0,556	0,420
CORPO43F5	10	10	0,78	2,20	1,4588	0,3853	0,4285	0,4118	0,4118	1,38	5,48	4,4235	0,2235	0,82	0,206	0,164
CORPO43F7	15	10	0,78	1,73	1,3706	0,2728	0,2728	0,3928	0,4513	7,18	-	2,8415	-	0,68	0,233	0,165
CORPO43F8	15	10	0,78	1,73	1,1904	0,2253	0,2253	0,4483	0,4870	4,80	-	1,9015	-	0,79	0,259	0,181
CORPO43F9	15	10	0,56	1,88	1,1515	0,2914	0,2914	0,2918	0,3470	6,84	-	2,5555	-	0,53	0,084	0,084
CORPO53F1	15	5	0,56	2,10	1,1856	0,3055	0,3055	0,2813	0,3115	4,97	7,86	2,7732	-	0,54	0,214	0,176
CORPO53F2	15	15	0,56	2,06	1,5551	0,3010	0,3010	0,7776	0,3932	3,61	5,48	2,1610	-	0,65	0,248	0,170
CORPO53F3	15	5	0,56	1,85	1,0903	0,2703	0,2703	0,3932	0,3932	5,43	15,00	2,3237	-	0,38	0,225	0,202
CORPO53F4	10	5	0,56	1,82	1,1622	0,2898	0,4256	0,3180	0,3399	6,16	14,79	1,8639	-	0,44	0,158	0,128
CORPO53F6	10	15	0,78	1,90	1,3288	0,4093	0,4093	0,4663	0,4896	4,80	2,06	4,5926	-	0,91	0,180	0,132
CORPO53F7	15	15	0,78	1,51	1,0626	0,3523	0,2836	0,5313	0,46	4,46	-	3,5420	-	0,98	0,214	0,153
CORPO6F1	15	5	0,56	1,55	0,9959	0,2242	0,2242	0,2545	0,2545	9,54	9,54	0,8631	-	0,20	0,175	0,165
CORPO6F2	15	15	0,56	1,86	1,5690	0,3656	0,3656	0,5441	0,5441	-	-	2,8596	-	0,58	0,160	0,120
CORPO6F3	15	5	0,56	1,53	1,3043	0,3103	0,3103	0,3888	0,4264	5,31	5,31	1,3043	0,2634	0,40	0,083	0,083
CORPO6F4	10	15	0,56	1,73	1,4863	0,2400	0,2400	0,4996	0,4996	-	3,26	2,8021	-	0,56	0,135	0,083
CORPO6F5	15	15	0,78	1,78	1,4948	0,2558	0,2558	0,7488	0,8599	2,92	-	4,2229	-	0,90	0,211	0,156
CORPO6F6	15	15	0,78	1,84	1,3197	0,2728	0,2728	0,6599	0,6599	-	-	2,6962	-	0,83	0,160	0,107
CORPO6F1F	15	15	1,13	2,02	1,6213	0,4040	0,4040	0,8107	0,8107	1,72	2,23	6,0234	-	1,18	0,329	0,203
CORPO63F3	10	10	0,56	1,46	1,2578	0,2232	0,2232	0,6289	0,6289	5,31	-	2,4501	-	0,48	0,162	0,150
CORPO63F4	10	10	0,56	1,52	0,9982	0,3316	0,3361	0,4197	0,4197	-	6,50	2,3135	-	0,52	0,085	0,065
CORPO63F5	10	10	0,78	2,22	1,3581	0,4099	0,4099	0,5657	0,5657	1,55	6,67	5,0407	0,3004	0,86	0,237	0,196
CORPO63F6	10	10	1,13	1,81	1,5442	0,3038	0,3522	0,3924	0,3924	-	5,48	2,7593	0,3164	0,96	0,395	0,303
CORPO63F7	15	10	1,13	1,68	1,2086	0,3902	0,3902	0,4418	0,4418	7,35	-	2,9491	-	1,19	0,436	0,324
CORPO63F9	15	10	0,78	1,38	1,1589	0,3881	0,2264	0,4151	0,4151	3,95	-	2,5132	-	0,50	0,266	0,235
CORPO9				1,52	1,3866			0,4513	0,4513	5,48	-	3,4483	-			
CORPO91				1,58	1,2276			0,4433	0,4433	7,69	2,92	2,0233	-			
CORPO51F9				1,58	1,1417			0,4956	0,4956	5,99	-	2,5688	-			
CORPO51F5				1,74	1,1475			0,2445	0,2445	2,75	7,86	2,2009	0,2822			
				1,74	1,2944		0,3011	0,4617	0,4617			2,7008				